



UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR

FACULTAD DE INGENIERÍA, CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICA

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

**ESTUDIO EXPERIMENTAL SOBRE EL ALCANCE Y LA DIRECCIÓN
DEL CHORRO A LA SALIDA DE LOS VERTEDEROS DE EXCESOS DE
LA PRESA TOACHI, PROYECTO TOACHI PILATÓN.**

**TRABAJO DE GRADUACIÓN PREVIO LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO
DE INGENIERO CIVIL
OPCIÓN HIDRÁULICA**

AUTOR:

DÁVILA RODRÍGUEZ DIMITRI DAVID

TUTOR: DR.- ING. MARCO CASTRO

QUITO-ECUADOR

2013

DEDICATORIA

Este trabajo se lo dedico principalmente a mis padres Teresa y Guillermo, por haberme apoyado en todo momento, por sus consejos, sus valores, pero más que nada por su amor, a mis hermanos John y Joelito que son mi motivación para salir adelante.

De igual forma a Leidy por ser una mujer tan especial que le ha dado felicidad a mi vida.

Dimitri Dávila Rodríguez

AGRADECIMIENTO

A Dios por llenarme de sus bendiciones y estar siempre presente en esos momentos difíciles. A mis padres, por ser el pilar fundamental de mi vida y por su apoyo incondicional ayudándome a alcanzar esta meta.

A mi director de tesis Dr. Ing. Marco Castro, por su constante y valiosa colaboración en este trabajo, por ser un ejemplo de profesional y ante todo por su calidad de persona. De igual forma a la Ing. Ximena Hidalgo por su amable acogida dentro del grupo de trabajo de la modelación hidráulica del Proyecto Toachi-Pilatón, y por haber depositado su confianza en nosotros.

A mis amigos Edwin Casa, Patricio Ortega, Pablo Paredes, Pablo Vera, los cuales me apoyaron con toda su buena voluntad en las pruebas de laboratorio para la realización de este trabajo y con los cuales hemos formado un excelente grupo de trabajo.

A Manuel Flores y Santiago Pilataxi, quienes me ayudaron en lo referente a la construcción del modelo.

A mis amigos y compañeros con quienes he compartido muchas experiencias en toda mi vida universitaria.

A mis profesores quienes con su sabiduría y experiencia formaron mi profesión.

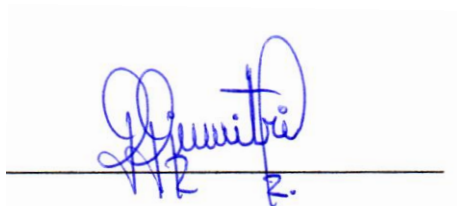
Dimitri Dávila Rodríguez

AUTORIZACIÓN DE LA AUTORÍA INTELECTUAL

Yo, DÁVILA RODRÍGUEZ DIMITRI DAVID en calidad de autor del trabajo de investigación o tesis realizada sobre ESTUDIO EXPERIMENTAL SOBRE EL ALCANCE Y LA DIRECCIÓN DEL CHORRO A LA SALIDA DE LOS VERTEDEROS DE EXCESOS DE LA PRESA TOACHI, PROYECTO TOACHI PILATÓN, por la presente autorizo a la UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR, hacer uso de todos los contenidos que nos pertenecen o de parte de los que contiene esta obra, con fines estrictamente académicos o de investigación.

Los derechos que como autores nos corresponden, con excepción de la presente autorización, seguirán vigentes a mi favor, de conformidad con lo establecido en los artículos 5, 6, 8, 19 y demás pertinentes de la Ley de Propiedad Intelectual y su Reglamento

Quito, 31 de Enero del 2013



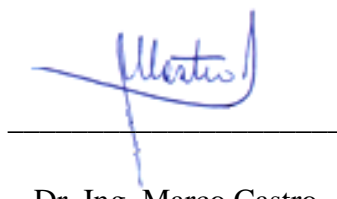
Dávila Rodríguez Dimitri David

C.C 0401315833

CERTIFICACIÓN

En calidad de Tutor del proyecto de Investigación: ESTUDIO EXPERIMENTAL SOBRE EL ALCANCE Y LA DIRECCIÓN DEL CHORRO A LA SALIDA DE LOS VERTEDEROS DE EXCESOS DE LA PRESA TOACHI, PROYECTO TOACHI PILATÓN, presentado y desarrollado por el señor: DÁVILA RODRÍGUEZ DIMITRI DAVID, previo a la obtención del Título de Ingeniero Civil, considero que el proyecto reúne los requerimientos necesarios.

En la ciudad de Quito, a los 31 días de Enero del 2013



Dr. Ing. Marco Castro

TUTOR

INFORME SOBRE CULMINACIÓN DE TESIS

TRABAJO DE GRADUACIÓN:

ESTUDIO EXPERIMENTAL SOBRE EL ALCANCE Y LA DIRECCIÓN DEL CHORRO A LA SALIDA DE LOS VERTEDEROS DE EXCESOS DE LA PRESA TOACHI, PROYECTO TOACHI-PILATÓN

TUTOR: Dr.-Ing. Marco Castro Delgado

FECHA: 04 de Febrero de 2013

1. ANTECEDENTES:

El Director de la Carrera de Ingeniería Civil solicita el informe sobre el Plan y Temario del Trabajo de Graduación, previo a la obtención del título de Ingeniero Civil presentado por el señor **DÁVILA RODRÍGUEZ DIMITRI DAVID**, que versa sobre " **ESTUDIO EXPERIMENTAL SOBRE EL ALCANCE Y LA DIRECCIÓN DEL CHORRO A LA SALIDA DE LOS VERTEDEROS DE EXCESOS DE LA PRESA TOACHI, PROYECTO TOACHI-PILATÓN**".

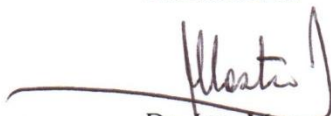
2. DESARROLLO DEL TRABAJO DE GRADUACIÓN:

- ❖ El señor estudiante procede a la recolección del material bibliográfico necesario para el desarrollo de la investigación en modelo físico, escala 1:50, de la estructura de disipación de energía al pie de la Presa Toachi. Esta actividad consiste en la recolección y revisión crítica de los textos y de las publicaciones sobre el tema de la modelación física de vertederos con saltos en esquí con y sin deflectores a la salida del mismo y a su vez la configuración de chorro como alcances, altura y forma. Adicionalmente, se revisó toda la información de la investigación previa con otra geometría de los saltos en esquí y del cuenco disipador.
- ❖ Se procede con la construcción y con la calibración del modelo construido en el Laboratorio del CIERHI- EPN.
- ❖ Se procede con la sistematización y ordenamiento de las fórmulas existentes y se llega a establecer la relación funcional a ser recomendada y analizada experimentalmente con ayuda del modelo.
- ❖ Se formula la metodología de cálculo y la correspondiente hoja para el análisis de los resultados experimentales del chorro lanzado a la salida de los deflectores.
- ❖ Se prepara los informes técnicos relacionados con las pruebas bajo una serie de caudales de vertido de la Presa.
- ❖ Se analiza y se ajustan los resultados experimentales a una función, la misma que es propuesta como representativa del fenómeno físico.

3. CONCLUSIONES:

Se considera que el aporte del trabajo de graduación está en la demostración del uso correcto y adecuado de la técnica de modelación física en la solución de problemas particulares del diseño de aprovechamientos hidroeléctricos.

Atentamente.



Dr.-Ing. Marco Castro D.
Profesor Principal
TUTOR



UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA, CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICA
SECRETARÍA

RESULTADO DEL TRABAJO DE GRADUACIÓN

CARRERA DE Ingeniería Civil

Quito, febrero 14 de 2013

Señor Dignit. David DÍAZ Rodríguez

Tema: ESTUDIO EXPERIMENTAL SOBRE EL ALCANCE
Y LA DIRECCION DEL CHORRO A LA SALIDA
DE LOS VERTEDEROS DE EXCESO DE LA PRESA
TOACHI, PROYECTO TOA CHI PELATON

CALIFICACIÓN:

TRIBUNAL	PROFESOR (A)	NOTA SOBRE VEINTE		FIRMA
		NUMERO	LETRAS	
PROFESOR TITULAR	Salomón JAYA	20	Veinte	
PROFESOR TITULAR	JAI ME GUTIERREZ	20	VEINTE	
PROMEDIO		20	VEINTE	

Dra. Katheryne Carrión Valdivieso
SECRETARIA ABOGADA (E)

CONTENIDO

DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTO	iii
AUTORIZACIÓN DE LA AUTORÍA INTELECTUAL	iv
CERTIFICACIÓN	v
HOJA DE APROBACIÓN DEL TUTOR	vi
RESULTADO DEL TRABAJO DE GRADUACIÓN	vii
CONTENIDO	viii
LISTA DE FIGURAS	xv
LISTA DE TABLAS	xvii
LISTA DE GRÁFICOS	xix
LISTA DE FOTOGRAFÍAS	xxii
LISTA DE PLANOS	xxiii
RESUMEN	xxiv
ABSTRACT	xxv

CAPÍTULO I

1 INTRODUCCIÓN	-1-
1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO Y DE LAS ESTRUCTURAS HIDRÁULICAS PRINCIPALES	-1-
1.1.1 APROVECHAMIENTO HIDROELÉCTRICO PILATÓN SARAPULLO	-2-
1.1.1.1 CAPTACIÓN DEL RIO PILATÓN	-3-
1.1.1.1.1 Estructura de Azudes – Vertederos	-3-
1.1.1.1.2 Estructura de la toma	-4-
1.1.1.1.3 Estructura de los desarenadores	-4-
1.1.1.1.4 Casas de control y obras anexas	-4-
1.1.1.2 OBRAS DE CONDUCCIÓN	-4-
1.1.1.2.1 Túnel de presión	-4-
1.1.1.2.2 Chimenea de equilibrio superior	-5-

1.1.1.2.3 Tubería de presión	-5-
1.1.1.2.4 Ramales distribuidores	-5-
1.1.1.3 CASA DE MÁQUINAS DE SARAPULLO.....	-5-
1.1.1.4 ORAS DE DESCARGA.....	-5-
1.1.1.4.1 Chimenea de equilibrio inferior	-5-
1.1.1.4.2 Túnel de descarga	-6-
1.1.1.4.3 Patio de maniobras.....	-6-
1.1.2 APROVECHAMIENTO HIDROELÉCTRICO TOACHI- ALLURIQUÍN.....	-6-
1.1.2.1 LA PRESA TOACHI Y SUS OBRAS ANEXAS.....	-6-
1.1.2.1.1 Obras de desvío del río para la construcción de la presa.....	-7-
1.1.2.1.2 Canal de alimentación de la toma.....	-7-
1.1.2.1.3 Obra de Toma y conexión con el túnel de descarga de Sarapullo.....	-8-
1.1.2.1.4 Mini central al pie de presa.....	-8-
1.1.2.1.5 Vertederos de excesos.....	-8-
1.1.2.1.6 Vertedero de descarga Sarapullo.....	-9-
1.1.2.1.7 Desagües de fondo.....	-9-
1.1.2.1.8 Estanque dissipador de energía.....	-9-
1.1.2.1.9 Galería de interconexión entre los dos aprovechamientos	-9-
1.1.2.2 OBRAS DE CONDUCCIÓN.....	-9-
1.1.2.2.1 Túnel de presión.....	-9-
1.1.2.2.2 Chimenea de equilibrio superior.....	-10-
1.1.2.2.3 Tubería de presión.....	-10-
1.1.2.2.4 Ramales distribuidores.....	-10-
1.1.2.2.5 Casa de máquinas de Alluriquín.....	-10-
1.1.2.3 OBRAS DE DESCARGA.....	-10-
1.1.2.3.1 Chimenea de equilibrio inferior.....	-10-
1.1.2.3.2 Túnel y estructura de descarga.....	-10-
1.1.2.3.3 Subestación Alluriquín.....	-11-
1.2 GENERALIDADES SOBRE EL PLAN DE OPERACIÓN DEL SISTEMA EN SU DISEÑO ORIGINAL.....	-11-

1.3	RESTRICCIONES EN EL DIMENSIONAMIENTO HIDRÁULICO DEL SALTO EN ESQUÍ.....	-12-
1.4	REQUERIMIENTOS PARA LA INVESTIGACIÓN EXPERIMENTAL.....	-13-
1.5	OBJETIVO GENERAL DEL ESTUDIO.....	-13-
1.6	OBJETIVOS ESPECÍFICOS DEL ESTUDIO EN MODELO FÍSICO....	-14-

CAPÍTULO II

2	DESCRIPCIÓN DEL FENÓMENO FÍSICO Y ANÁLISIS TEÓRICO DISPONIBLE.....	-15-
2.1	RESUMEN DE LA TEORÍA SOBRE EL CHORRO DE SALIDA DEL SALTO EN ESQUÍ.....	-15-
2.1.1	DESINTEGRACIÓN DEL CHORRO EN EL AIRE.....	-18-
2.1.2	DISEÑO DEL SALTO EN ESQUÍ.....	-19-
2.1.2.1	RADIO MÍNIMO.....	-19-
2.1.2.2	ALTURA MÍNIMA.....	-20-
2.1.2.3	ÁNGULO DE TRAYECTORIA.....	-21-
2.1.2.4	ÁNGULO DE IMPACTO O INCIDENCIA.....	-21-
2.2	ALCANCE Y CONFIGURACIÓN DEL CHORRO DE SALIDA DEL SALTO EN ESQUÍ	-22-
2.3	RESUMEN DE LA LITERATURA TÉCNICA DISPONIBLE.....	-24-
2.3.1	ECUACIÓN DE ELEVATORSKY.....	-24-
2.3.2	ECUACIÓN DE KAWAKAMI.....	-25-
2.3.3	ECUACIÓN DE LA U.S.A CORPS OF ENGINEERS.....	-26-
2.3.4	ECUACIÓN HIDROTOAPI E.P.....	-26-
2.4	CONCLUSIONES.....	-27-

CAPÍTULO III

3	ANÁLISIS DIMENSIONAL SOBRE EL FENÓMENO DEL CHORRO A LA SALIDA DEL ESQUÍ	-28-
3.1	SIMILITUD GEOMÉTRICA.....	-28-

3.2	SIMILITUD CINEMÁTICA.....	-28-
3.3	SIMILITUD DINÁMICA RESTRINGIDA	-29-
3.3.1	SIMILITUD DINÁMICA RESTRINGIDA DE FROUDE.....	-30-
3.4	SIMILITUD DINÁMICA EXACTA.....	-33-
3.4.1	EFFECTOS DE ESCALA.....	-33-
3.5	JUSTIFICACIÓN DE LA SELECCIÓN DE LA ESCALA DEL MODELO EXISTENTE.....	-33-
3.6	CONCLUSIONES.....	-35-

CAPÍTULO IV

4	DESCRIPCIÓN DEL MODELO FÍSICO Y DE LA CONSTRUCCIÓN DE LAS VARIANTES	-37-
4.1	DISEÑO DEL MODELO HIDRÁULICO FÍSICO EXISTENTE.....	-37-
4.1.1	ZONA DE INGRESO.....	-37-
4.1.1.1	SISTEMA DE TUBERÍAS.....	-38-
4.1.1.2	TANQUE DE ABASTECIMIENTO.....	-39-
4.1.1.3	CANAL DE INGRESO.....	-40-
4.1.2	MODELO FÍSICO PRESA TOACHI Y OBRAS COMPLEMENTARIAS.....	-41-
4.1.2.1	VERTEDEROS DE EXCESOS.....	-42-
4.1.2.1.1	Deflectores del diseño original.....	-44-
4.1.2.2	DESAGÜES DE FONDO.....	-45-
4.1.2.3	VERTEDERO SARAPULLO MODIFICADO.....	-47-
4.1.2.4	CUENCO DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA Y TRANSICIÓN.....	-48-
4.1.2.5	EMBALSE Y ATAGUÍA.....	-50-
4.1.2.6	CANAL DE TOMA	-51-
4.1.3	ZONA DE SALIDA Y RESTITUCIÓN AL RÍO	-52-
4.2	CHEQUEO DE LAS DIMENSIONES DE LA MODELACIÓN DE LAS ALTERNATIVAS.....	-53-
4.2.1	ALTERNATIVA A: PAREDES CONVERGENTES SOBRE EL ESQUÍ.....	-54-

4.2.2 ALTERNATIVA A-1: PARED CONVERGENTE A LA DERECHA DE EL ESQUÍ.....	-56-
4.2.3 ALTERNATIVA B: DEFLECTORES DE ALTURAS VARIABLES.....	-58-
4.2.4 ALTERNATIVA C: DEFLECTOR PERALTADO.....	-61-
4.2.5 ALTERNATIVA D: DISEÑO ORIGINAL MODIFICADO.....	-64-
4.3 INSTRUMENTACIÓN.....	-68-
4.3.1 VERTEDERO TRIANGULAR DE 90° DE PARED DELGADA.....	-68-
4.3.2 LIMNÍMETROS.....	-69-
4.3.3 REGLAS Y CINTA MÉTRICA.....	-70-
4.3.4 ESTACIÓN TOTAL LEICA.....	-70-
4.3.5 NIVEL TOPOGRÁFICO WILD.....	-71-
4.4 CONCLUSIONES.....	-72-

CAPÍTULO V

5 PLAN DE PRUEBAS PARA LA INVESTIGACIÓN EXPERIMENTAL.....	-73-
5.1 PLAN DE PRUEBAS.....	-73-
5.1.1 PLAN DE PRUEBAS GRUPO I.....	-73-
5.1.2 PLAN DE PRUEBAS GRUPO II.....	-75-
5.2 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	-77-

CAPÍTULO VI

6 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DEL CHORRO DESDE LOS SALTOS EN ESQUÍ	-79-
6.1 PRESENTACIÓN DE LOS RESULTADOS DE LAS ALTERNATIVAS CON EL DISEÑO ORIGINAL(GRUPO I).....	-79-
6.1.1 PRUEBA O ₁ (DEFLECTORES DISEÑO ORIGINAL Q=398m ³ /s).....	-80-
6.1.2 PRUEBA A ₁ (DEFLECTORES ALTERNATIVA A Q=397m ³ /s).....	-81-
6.1.3 PRUEBA B ₁ (DEFLECTORES ALTERNATIVA B Q=403m ³ /s).....	-82-
6.1.4 PRUEBA C ₁ (DEFLECTORES ALTERNATIVA C Q=402.8m ³ /s).....	-83-

6.1.5 PRUEBA D ₁ (DEFLECTORES ALTERNATIVA D Q=395.6m ³ /s).....	-84-
6.1.6 PRUEBA O ₂ (DEFLECTORES DISEÑO ORIGINAL Q=595m ³ /s).....	-85-
6.1.7 PRUEBA A ₂ (DEFLECTORES ALTERNATIVA A Q=605.45m ³ /s)....	-86-
6.1.8 PRUEBA A1 ₂ (DEFLECTOR ALTERNATIVA A1 Q=606.10m ³ /s)....	-87-
6.1.9 PRUEBA B ₂ (DEFLECTORES ALTERNATIVA B Q=606.12m ³ /s)....	-88-
6.1.10 PRUEBA C ₂ (DEFLECTORES ALTERNATIVA C Q=600.77m ³ /s)....	-89-
6.1.11 PRUEBA D ₂ (DEFLECTORES ALTERNATIVA D Q=598.80m ³ /s)....	-90-
6.2 PRESENTACIÓN DE LOS RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DEL GRUPO II.....	-91-
6.2.1 PRUEBA DA (DEFLECTORES ALTERNATIVA D Q=1203.1m ³ /s).	-92-
6.2.2 PRUEBA DB (DEFLECTORES ALTERNATIVA D Q=1002.57m ³ /s).	-93-
6.2.3 PRUEBA DC (DEFLECTORES ALTERNATIVA D Q=701.32m ³ /s)..	-93-
6.2.4 PRUEBA DD (DEFLECTORES ALTERNATIVA D Q=499.57m ³ /s).	-94-
6.2.5 PRUEBA DE (DEFLECTORES ALTERNATIVA D Q=197.89m ³ /s).	-95-
6.3 ANÁLISIS DEL CHORRO A LA SÁLIDA DEL ESQUÍ DE LAS DIFERENTES ALTERNATIVAS DEL GRUPO I.....	-96-
6.3.1 CHORRO A LA SALIDA DE LOS DEFLECTORES DEL DISEÑO ORIGINAL.....	-97-
6.3.2 CHORRO A LA SALIDA DE LOS DEFLECTORES DE LA ALTERNATIVA A.....	-98-
6.3.3 CHORRO A LA SALIDA DEL DEFLECTOR DE LA ALTERNATIVA A-1.....	-99-
6.3.4 CHORRO A LA SALIDA DE LOS DEFLECTORES DE LA ALTERNATIVA B.....	-100-
6.3.5 CHORRO A LA SALIDA DEL DEFLECTOR DE LA ALTERNATIVA C.....	-101-
6.3.6 CHORRO A LA SALIDA DE LOS DEFLECTORES DE LA ALTERNATIVA D.....	-102-
6.4 ANÁLISIS DEL CHORRO A LA SÁLIDA DEL ESQUÍ DE LAS PRUEBAS DEL GRUPO II.....	-104-
6.4.1 CHORROS PRUEBA DA (Q=1203.12 m ³ /s).....	-105-

6.4.2	CHORROS PRUEBA DB (Q=1002.57 m ³ /s).....	-106-
6.4.3	CHORROS PRUEBA DC (Q=701.32 m ³ /s).....	-107-
6.4.4	CHORROS PRUEBA DD (Q=499.57 m ³ /s).....	-108-
6.4.5	CHORROS PRUEBA DE (Q=197.89 m ³ /s).....	-108-
6.5	ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES.....	-111-
6.5.1	ALCANCES Y ALTURAS TEÓRICOS DE LAS PRUEBAS DEL GRUPO I	-112-
6.5.2	ALCANCES Y ALTURAS TEÓRICOS DE LAS PRUEBAS DEL GRUPO II	-115-
6.6	ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE LOS VALORES EXPERIMENTALES.....	-116-
6.7	CONCLUSIONES.....	-119-
 CAPÍTULO VII		
7	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	-122-
7.1	CONCLUSIONES SOBRE EL ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LAS ALTERNATIVAS DE DISEÑO	-122-
7.2	CONCLUSIONES SOBRE EL PROYECTO DE TITULACIÓN.....	-125-
7.3	RECOMENDACIONES.....	-126-
 GLOSARIO DE TÉRMINOS.....		-127-
 BIBLIOGRAFÍA.....		-129-
 ANEXOS		
ANEXO No 1.- REGISTRO DE DATOS EXPERIMENTALES.....		-132-
ANEXO No 2.- REGISTRO FOTOGRÁFICO.....		-149-
ANEXO No 3.- PLANOS.....		-172-

LISTA DE FIGURAS

Figura No 1.1	Implantación General del Proyecto.....	-2-
Figura No 1.2	Planta de la captación del río Pilatón.....	-3-
Figura No 1.3	Planta de la Presa Toachi y sus obras complementarias.....	-7-
Figura No 1.4	Presa Toachi – Vista aguas abajo, subdivisión de los bloques....	-7-
Figura No 2.1	Disipador tipo salto esquí.....	-16-
Figura No 2.2	Disipador tipo salto esquí sumergido.....	-16-
Figura No 2.3	Disipador tipo salto esquí estriado.....	-17-
Figura No 2.4	Jet tipo hendidura, (a) vista longitudinal, (b) Vista en planta....	-18-
Figura No 2.5	Parámetros para el diseño de salto en esquí.....	-19-
Figura No 2.6	Medidas recomendadas para deflectores, lisos(a) y estriado (b).-	-21-
Figura No 2.7	Definición de la trayectoria del chorro.....	-22-
Figura No 2.8	Distribución transversal del chorro.....	-23-
Figura No 2.9	Trayectoria del chorro según Elevatorsky.....	-24-
Figura No 2.10	Ábaco de Kawakami, efecto de la resistencia del aire.....	-26-
Figura No 2.11	Trayectoria del chorro según U.S.A. Corps of Engineers.....	-26-
Figura No 4.1	Esquema general de la Presa Toachi y sus obras complementarias.....	-37-
Figura No 4.2	Implantación de las líneas de abastecimiento en el CIERHI.....	-39-
Figura No 4.3	Esquema del corte transversal del vertedero de excesos.....	-43-
Figura No 4.4	Esquema del corte transversal del desagüe de fondo.....	-46-
Figura No 4.5	Esquema del corte transversal del vertedero Sarapullo.....	-47-
Figura No 4.6	(a) Cuenco disipador original (b) Cuenco disipador recomendado.....	-49-
Figura No 4.7	Vista general en 3D de la alternativa A.....	-54-
Figura No 4.8	(a) Dimensiones en planta alternativa A (b) Dimensiones de las paredes de contracción.....	-55-
Figura No 4.9	Vista general en 3D de la alternativa A-1.....	-57-
Figura No 4.10	(a) Dimensiones en planta alternativa A-1 (b) Dimensión de la pared de contracción derecha.....	-57-

Figura No 4.11	Vista general en 3D de la alternativa B.....	-59-
Figura No 4.12	(a) Dimensiones en planta alternativa B (b) Dimensiones de los tres deflectores de la alternativa B.....	-60-
Figura No 4.13	Vista general en 3D de la alternativa C.....	-62-
Figura No 4.14	(a) Dimensiones en planta alternativa C (b) Dimensiones en corte del deflector peraltado.....	-63-
Figura No 4.15	Dimensiones de la vista frontal de la alternativa C.....	-63-
Figura No 4.16	Vista general en 3D de la alternativa D.....	-65-
Figura No 4.17	(a) Dimensiones en planta alternativa D (b) Dimensiones en corte del deflector trapezoidal.....	-66-
Figura No 4.18	Dimensiones de la vista frontal de la alternativa D.....	-66-
Figura No 6.1	Trayectoria del chorro y sus parámetros a medirse.....	-80-
Figura No 6.2	Nomenclatura usada en el procesamiento de datos.....	-117-

LISTA DE TABLAS

Tabla No 3.1 Parámetros adimensionales.....	-30-
Tabla No 3.2 Escala de magnitudes según criterio de Froude.....	-31-
Tabla No 3.3 Selección de la escala del modelo.....	-35-
Tabla No 4.1 Datos principales de las tuberías de ingreso al tanque.....	-38-
Tabla No 4.2 Características geométricas del tanque de abastecimiento.....	-39-
Tabla No 4.3 Datos de los vertederos de excesos en modelo y prototipo.....	-43-
Tabla No 4.4 Datos de los deflectores en modelo y prototipo.....	-44-
Tabla No 4.5 Datos de los desagües de fondo en modelo y prototipo.....	-45-
Tabla No 4.6 Datos del Vertedero Sarapullo en modelo y prototipo.....	-47-
Tabla No 4.7 Datos del cuenco dissipador recomendado en modelo y prototipo.....	-48-
Tabla No 4.8 Datos de la transición en modelo y prototipo.....	-49-
Tabla No 4.9 Datos del embalse y de la ataguía en modelo y prototipo.....	-50-
Tabla No 4.10 Datos del canal de toma y bocatoma en modelo y prototipo.....	-51-
Tabla No 4.11 Datos del tanque y canal de salida en modelo.....	-52-
Tabla No 4.12 Datos generales de la alternativa A.....	-54-
Tabla No 4.13 Datos generales de la alternativa A-1.....	-56-
Tabla No 4.14 Datos generales de la alternativa B.....	-59-
Tabla No 4.15 Datos generales de la alternativa C.....	-62-
Tabla No 4.16 Datos generales de la alternativa D.....	-65-
Tabla No 5.1 Ensayo de granulometría del material pétreo.....	-74-
Tabla No 5.2 Plan de pruebas Grupo I.....	-75-
Tabla No 5.3 Caudales de crecida en el sitio de la presa Toachi.....	-76-
Tabla No 5.4 Plan de pruebas Grupo II.....	-77-
Tabla No 6.1 Comparación entre caudales reales ensayados con caudales planeados Grupo I.....	-79-
Tabla No 6.2 Resultados experimentales prueba O ₁	-81-
Tabla No 6.3 Resultados experimentales prueba A ₁	-82-
Tabla No 6.4 Resultados experimentales prueba B ₁	-83-
Tabla No 6.5 Resultados experimentales prueba C ₁	-84-

Tabla No 6.6 Resultados experimentales prueba D ₁	-85-
Tabla No 6.7 Resultados experimentales prueba O ₂	-86-
Tabla No 6.8 Resultados experimentales prueba A ₂	-87-
Tabla No 6.9 Resultados experimentales prueba A1 ₂	-88-
Tabla No 6.10 Resultados experimentales prueba B ₂	-89-
Tabla No 6.11 Resultados experimentales prueba C ₂	-90-
Tabla No 6.12 Resultados experimentales prueba D ₂	-91-
Tabla No 6.13 Comparación entre caudales reales ensayados con caudales planeados Grupo II.....	-91-
Tabla No 6.14 Resultados experimentales prueba D _A	-92-
Tabla No 6.15 Resultados experimentales prueba D _B	-93-
Tabla No 6.16 Resultados experimentales prueba D _C	-94-
Tabla No 6.17 Resultados experimentales prueba D _D	-95-
Tabla No 6.18 Resultados experimentales prueba D _E	-96-
Tabla No 6.19 Resultados experimentales Q400m ³ /s.....	-96-
Tabla No 6.20 Resultados experimentales Q600m ³ /s.....	-97-
Tabla No 6.21 Resultados experimentales de las pruebas del Grupo II.....	-105-
Tabla No 6.22 Alcances teóricos de las pruebas del Grupo I.....	-112-
Tabla No 6.23 Comparación de los alcances experimentales con los teóricos del Grupo I.....	-113-
Tabla No 6.24 Comparación de las alturas experimentales con las teóricas del Grupo I.....	-114-
Tabla No 6.25 Alcances teóricos pruebas del Grupo II.....	-115-
Tabla No 6.26 Comparación de los alcances experimentales con los teóricos del Grupo II.....	-115-
Tabla No 6.27 Comparación de las alturas experimentales con las teóricas del Grupo II.....	-116-

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfica No 4.1 Curva de descarga de los vertederos triangulares	- 69 -
Gráfica No 5.1 Curva granulométrica del material pétreo del Grupo I.	- 74 -
Gráfica No 5.2 Curva granulométrica del material pétreo del Grupo II.	- 76 -
Gráfica No 6.1 Comparación de los alcances máximos de los chorros para el Grupo I del plan de pruebas	- 103 -
Gráfica No 6.2 Comparación de las alturas máximas de los chorros para el Grupo I del plan de pruebas	- 104 -
Gráfica No 6.3 Comparación de las alturas máximas de los chorros para el Grupo II del plan de pruebas	- 110 -
Gráfica No 6.4 Comparación de las alturas máximas de los chorros para el Grupo II del plan de pruebas	- 111 -
Gráfica No 6.5 (Alcance Experimental/Alcance Teórico) vs Qadim	- 118 -
Gráfica No 6.6 (Altura Experimental/Altura Teórico) vs Qadim	- 119 -

LISTA DE FOTOGRAFÍAS

Fotografía No 4.1	Tanque de abastecimiento.....	-40-
Fotografía No 4.2	Componentes de ingreso al modelo físico.....	-41-
Fotografía No 4.3	Modelo físico de la presa Toachi y sus obras complementarias.....	-42-
Fotografía No 4.4	Estructura de los vertederos de excesos instalado.....	-44-
Fotografía No 4.5	Estructura de los deflectores y corte transversal del mismo.....	-45-
Fotografía No 4.6	Estructura de los desagües de fondo instalados.....	-46-
Fotografía No 4.7	Estructura del vertedero Sarapullo instalado.....	-48-
Fotografía No 4.8	Estructura del cuenco dissipador y transición al río.....	-50-
Fotografía No 4.9	Estructura del embalse y de la ataguía.....	-51-
Fotografía No 4.10	Estructura del canal de toma y bocatoma.....	-52-
Fotografía No 4.11	Estructura del tanque de salida y canal de descarga.....	-53-
Fotografía No 4.12	(a) Construcción de las paredes laterales en acrílico (b) Instalación de las paredes laterales.....	-55-
Fotografía No 4.13	Vista de la alternativa A construida en el modelo.....	-56-
Fotografía No 4.14	(a) Colocación de nuevo silicón en las uniones de la pared lateral derecha (b) Vista de la alternativa A-1 construida en el modelo.....	-58-
Fotografía No 4.15	(a) Colocación de las plantillas de los deflectores en el bloque de madera (b) Elaboración de los deflectores.....	-60-
Fotografía No 4.16	(a) Lijado de los deflectores después de ser sellados y masillados (b) Pintado de los deflectores.....	-61-
Fotografía No 4.17	(a) Instalación de cada uno de los deflectores (b) Vista de la alternativa B construida en el modelo.....	-61-
Fotografía No 4.18	(a) Colocación de la plantilla y proceso de cortado (b) Obtención del molde peraltado.....	-64-
Fotografía No 4.19	(a) Instalación de la tapa frontal (b) Implantación total de la alternativa C.....	-64-

Fotografía No 4.20 (a) Colocación de la plantilla y proceso de cortado (b) Lijado del molde del esquí.....	-67-
Fotografía No 4.21 (a) Lijado de los moldes de los deflectores (b) Esquí, deflectores y pared lateral terminados.....	-67-
Fotografía No 4.22 (a) Instalación de los deflectores y pared lateral (b) Implantación total de ala alternativa D.....	-67-
Fotografía No 4.23 (a) Vertedero triangular a la entrada (b) Vertedero triangular a la salida.....	-68-
Fotografía No 4.24 (a) Limnómetro instalado en el canal de ingreso (b) Limnómetros instalados en el embalse.....	-70-
Fotografía No 4.25 (a) Regla metálica para medición de calados de agua en el vertedero y deflectores (b) Cinta de medida en el embalse (c). Cinta de medida en el cuenco de disipación para registrar el alcance de los chorros de descarga...	-70-
Fotografía No 4.26 Estación total LEICA utilizada para levantamientos topográficos.....	-71-
Fotografía No 4.27 Nivel topográfico WILD.....	-71-
Fotografía No 6.1 Trayectoria del chorro prueba O ₁	-80-
Fotografía No 6.2 Trayectoria del chorro prueba A ₁	-81-
Fotografía No 6.3 Trayectoria del chorro prueba B ₁	-82-
Fotografía No 6.4 Trayectoria del chorro prueba C ₁	-83-
Fotografía No 6.5 Trayectoria del chorro prueba D ₁	-84-
Fotografía No 6.6 Trayectoria del chorro prueba O ₂	-85-
Fotografía No 6.7 Trayectoria del chorro prueba A ₂	-86-
Fotografía No 6.8 Trayectoria del chorro prueba A ₁₂	-87-
Fotografía No 6.9 Trayectoria del chorro prueba B ₂	-88-
Fotografía No 6.10 Trayectoria del chorro prueba C ₂	-89-
Fotografía No 6.11 Trayectoria del chorro prueba D ₂	-90-
Fotografía No 6.12 Trayectoria de los chorros prueba D _A	-92-
Fotografía No 6.13 Trayectoria de los chorros prueba D _B	-93-
Fotografía No 6.14 Trayectoria de los chorros prueba D _C	-94-
Fotografía No 6.15 Trayectoria de los chorros prueba D _D	-94-

Fotografía No 6.16	Trayectoria de los chorros prueba D _E	-95-
Fotografía No 6.17	Comportamiento del chorro de descarga con el diseño original.....	-97-
Fotografía No 6.18	Comportamiento del chorro de descarga con la Alternativa A.....	-98-
Fotografía No 6.19	Comportamiento del chorro de descarga con la Alternativa A1.....	-99-
Fotografía No 6.20	Comportamiento del chorro de descarga con la Alternativa B.....	-100-
Fotografía No 6.21	Comportamiento del chorro de descarga con la Alternativa C.....	-101-
Fotografía No 6.22	Comportamiento del chorro de descarga con la Alternativa D.....	-102-
Fotografía No 6.23	Comportamiento de los chorros de la prueba D _A	-105-
Fotografía No 6.24	Comportamiento de los chorros de la prueba D _B	-106-
Fotografía No 6.25	Comportamiento de los chorros de la prueba D _C	-107-
Fotografía No 6.26	Comportamiento de los chorros de la prueba D _D	-108-
Fotografía No 6.27	Comportamiento de los chorros de la prueba D _E	-109-

LISTA DE PLANOS

Plano No 1: Implantación general del modelo.....	-173-
Plano No 2: Vista en planta del cuenco de disipación de energía recomendado Grupo I del plan de pruebas.....	-174-
Plano No 3: Vertedero de excesos con deflectores trapezoidales y contracción lateral empleado en el Grupo II del plan de pruebas.....	-175-

RESUMEN

ESTUDIO EXPERIMENTAL SOBRE EL ALCANCE Y LA DIRECCIÓN DEL CHORRO A LA SALIDA DE LOS VERTEDEROS DE EXCESOS DE LA PRESA TOACHI, PROYECTO TOACHI PILATÓN

El presente trabajo de investigación tiene como objetivo principal el análisis de la dirección, alcance y forma del chorro proyectado por el vertedero de excesos derecho de la presa Toachi, Proyecto Toachi-Pilatón, utilizando diferentes alternativas de deflectores los mismos que se ubican en el esquí del vertedero, de tal forma de ver cuál de estas alternativas logre que el impacto del chorro se produzca en la parte central del cuenco disipador de energía, evitando de esta manera que el efecto de socavación afecte la estabilidad de los taludes laterales del cuenco disipador.

En este trabajo de titulación se expondrá las bases y criterios teóricos para el diseño de saltos en esquí y la configuración del chorro a la salida de los mismos, además se abordará el tema de la modelación física, misma que es fundamental para un estudio de esta índole, ya que se planteará teorías para la selección de escalas, semejanza y las restricciones del fenómeno a ser analizado.

Como resultados obtenidos se concluye que la alternativa C (deflector peraltado), logra desviar de mejor manera el chorro hacia el centro del cuenco de disipación.

DESCRIPTORES: MODELO FÍSICO/ SALTOS EN ESQUÍ /
DEFLECTORES/ CONFIGURACIÓN DEL CHORRO / PROYECTO TOACHI-
PILATÓN / CUENCO DISIPADOR

ABSTRACT

EXPERIMENTAL STUDY ABOUT JET'S REACH AND DIRECTION AT THE EXCESS SPILLWAY OUTPUT OF TOACHI DAM, TOACHI PILATÓN PROJECT.

The main goal of this research is to analyze the jet's form, reach and direction projected by the right excess spillway of Toachi Dam. Different alternatives of buckets, which are located on the spillway ski, are proved. Thus, it could be observed what bucket has produced a jet impact at the central part of the stilling pool. Furthermore, it would avoid that the undermining effect produces an instability of the lateral stilling pool slopes.

This research will explain the theoretical basis and criteria about designing ski jumps and configuring the output jet. Moreover, Physical Model topic, which is essential in this study, will be addressed. Theories such as: scale selection, likeness and restriction will be proposed.

In conclusion, the results show that alternative C (raised bucket) achieves a better jet deflect to the stilling pool center.

DESCRIPTORS: PHYSICAL MODEL/ SKI JUMP/ BUCKET/ JET SET/
TOACHI PILATON PROJECT/ STILLING POOL

CAPÍTULO I

1 INTRODUCCIÓN

1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO Y DE LAS ESTRUCTURAS HIDRÁULICAS PRINCIPALES

El proyecto hidroeléctrico Toachi – Pilatón es parte esencial del desarrollo energético del Ecuador por sus características energéticas, por sus parámetros económicos y por estar ubicado en la vertiente de drenaje del Pacífico. Esta vertiente tiene un comportamiento hidrológico complementario con el de la vertiente del Amazonas, en donde están la mayor parte de las principales centrales hidroeléctricas en operación.

Se encuentra ubicado aproximadamente a 80 Kilómetros al sur-oeste de la ciudad de Quito cerca de la vía Aloag – Santo Domingo de los Tsáchilas, desarrollándose entre los límites de las provincias de Pichincha, Cotopaxi y Santo Domingo de los Tsáchilas.

El proyecto está constituido por dos aprovechamientos en cascada llamados Pilatón – Sarapullo y Toachi – Alluriquín, los cuales tienen una potencia instalada de 49 MW con un caudal de $40\text{m}^3/\text{s}$ y de 204 MW con un caudal de $100\text{m}^3/\text{s}$ respectivamente, aportando en conjunto alrededor de 253MW al Sistema Nacional Interconectado (SIN) y un total de 1120 GWh/año para el Sistema Eléctrico Nacional. Adicionalmente se dispondrá de una mini central al pie de la presa del Toachi, de 1.4 MW, que turbinará en forma constante el caudal ecológico de $4.14\text{ m}^3/\text{s}$.

La cuenca superior del río Pilatón, antes de su confluencia con el río Toachi, tiene una longitud de 40 Km aproximadamente y un ancho medio de 20 Km. El área de drenaje hasta el sitio de captación, en la cota 1099.00 msnm, es 521 Km^2 . La dirección general de la cuenca es Este a Oeste.

La cuenca del río Toachi hasta el sitio de la presa (cota 914.00 msnm), que es inmediatamente aguas abajo de recibir a su río afluente Sarapullo, se extiende sobre una longitud de 85 Km y un ancho medio de 20 Km, con una superficie de drenaje de 1476 Km^2 . La dirección general del valle es Sur a Norte y abarca alturas comprendidas entre 4500.00 y 910.00 msnm.

La captación del Pilatón está localizada en las coordenadas N 9°961,630; E 737.980 y la presa del Toachi N 9°959,340; E 731,980, respectivamente, del sistema UTM WGS 84.

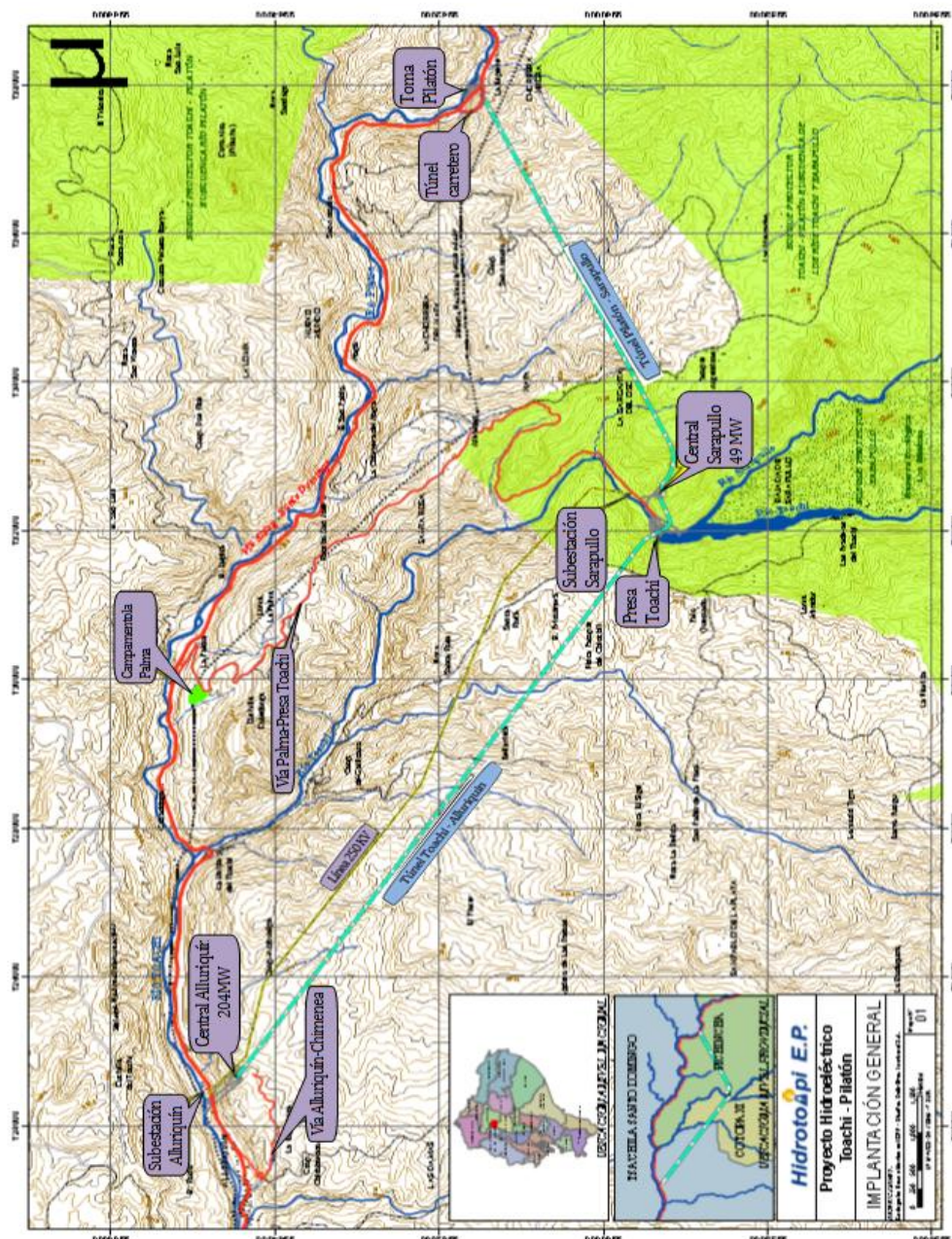


Figura No 1.1 Implantación General del Proyecto

1.1.1 APROVECHAMIENTO HIDROELÉCTRICO PILATÓN SARAPULLO¹

Este es un aprovechamiento de 49MW de potencia instalada, que explota una altura bruta de 145 m. y caudales de 40 m³/s. Está constituida por:

¹ Hidrotoapi E.P “Descripción del proyecto hidroeléctrico Toachi- Pilatón “. Presa Toachi. Quito.2011

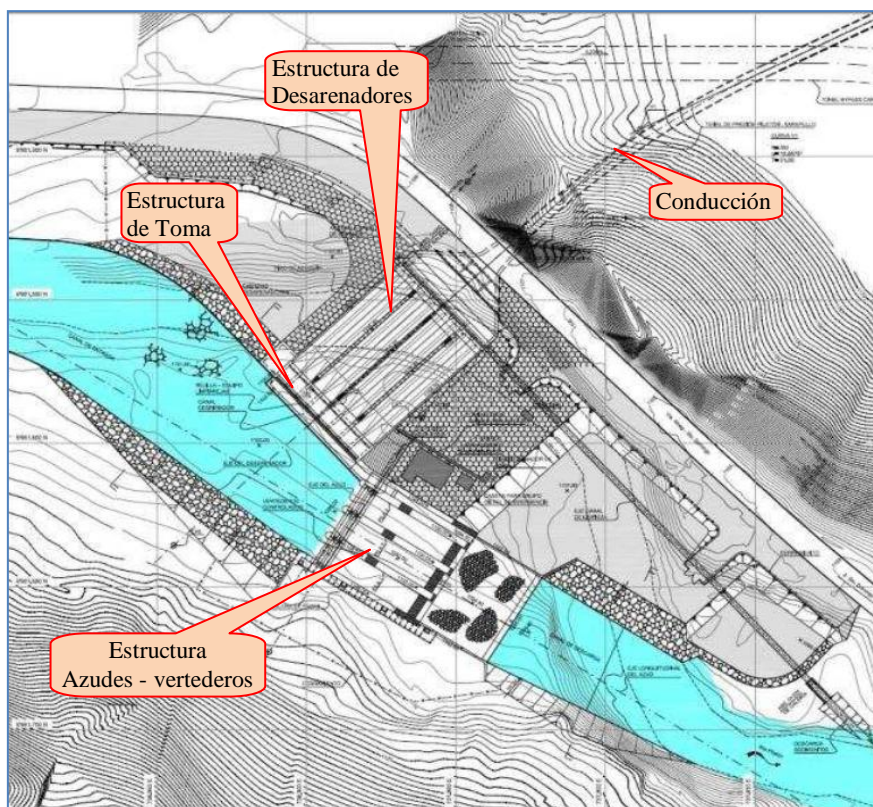


Figura No 1.2 Planta de la captación del río Pilatón

1.1.1.1 CAPTACIÓN DEL RÍO PILATÓN

La captación está conformada por tres estructuras hidráulicas importantes con sus obras anexas como: Estructura de Azudes – Vertederos; Estructura de Toma y Estructura de desarenadores, las mismas que se detallan a continuación.

1.1.1.1.1 Estructura de Azudes – Vertederos

Se encuentra implantada en la margen derecha del río ocupando un ancho de 33.90 m y una longitud de 41.15 m, esta permite la derivación del caudal de operación del aprovechamiento Pilatón- Sarapullo, la descarga de los caudales de excesos y de crecidas del río y la limpieza de materiales sólidos transportados por él. Esta estructura está conformada por tres azudes los cuales se encuentran separados mediante pilas y muros de 2.50 m de ancho, el paso de agua por los azudes es controlado mediante compuertas radiales de B x H= 8.20 m x 5.00 m, y estas a su vez por clapetas de 1.40 m de altura las cuales sirven para regular caudales y mantener el nivel de operación. Estas estructuras son diseñadas para un caudal de crecida registrado en la historia del río Pilatón de $480\text{m}^3/\text{s}$.

1.1.1.1.2 Estructura de la toma

Esta estructura permitirá la captación de los caudales de hasta $40\text{m}^3/\text{s}$, que serán turbinados en la casa de máquinas de Sarapullo para luego alimentar parcialmente al aprovechamiento Toachi - Alluriquín, está conformada por una rejilla de 39 m de longitud y 1.60 m de altura con ángulo de inclinación de 75° (para facilitar la limpieza de basuras y ramas que trae consigo el río Pilatón), de igual manera la separación de los barrotes está diseñada para impedir el paso de cantos rodados de tamaño mayor a 3.6 cm de diámetro.

Delante de la compuerta se dispone de un canal desripador de 2.50 m de ancho por 41.0 m de longitud, con una pendiente del 4% que está controlado por compuertas radiales de $B \times H = 2.50 \text{ m} \times 2.00 \text{ m}$, que lo conecta con el canal de limpieza, con una pendiente del 10.50 % que está dispuesto paralelamente al lado izquierdo de los azudes.

1.1.1.1.3 Estructura de los desarenadores

Se encuentra a continuación de la toma y está conformada por cuatro cámaras desarenadoras que funcionarán en paralelo, cada una con doble cámara de sedimentación cuyas dimensiones $L \times B \times H = 4.0 \text{ m} \times 9.0 \text{ m} \times 4.5 \text{ m}$, con una transición de entrada de 9.0 m de longitud.

Los desarenadores retendrán sedimentos de diámetro superior a 0.3 mm. Las aguas libres de los sedimentos retenidos en las ocho cámaras serán vertidas a través de ocho vertederos a un tanque que constituye la embocadura al túnel de carga la misma que dispone de una transición de doble curvatura y que se desarrolla en 20.0 m de longitud.

1.1.1.1.4 Caseta de control y obras anexas

La caseta de control de las estructuras de la captación será dispuesta en el relleno que se realizará junto a los desarenadores, inmediatamente aguas abajo de ellos. A su alrededor se dispondrá de los accesos desde el carretero y patios de parqueaderos.

1.1.1.2 OBRAS DE CONDUCCIÓN

1.1.1.2.1 Túnel de presión

Este túnel inicia al final de la captación, es de sección interna circular, de 3.80 m de diámetro, integralmente revestido de hormigón de 0.30 m de espesor, su longitud es de 5.90 Km hasta donde comienza el inicio de blindaje de la tubería a presión.

1.1.1.2.2 Chimenea de equilibrio superior

Esta chimenea está ubicada 55.0 m aguas abajo del inicio de la tubería de presión y esta desplazada 20.0 m del eje de la conducción. Está compuesta por un pozo vertical inferior (garganta) con un diámetro interior de 3.50 m hasta la cota 1065 msnm; y, a partir de este, el pozo principal de la chimenea es de 12.00 m de diámetro, hasta el nivel 1129 msnm, en donde sale a la superficie y está protegida por una cubierta.

Toda la chimenea será revestida de hormigón, la garganta con 0.35 m y el pozo principal con 0.55 m.

1.1.1.2.3 Tubería de presión

El ramal principal tiene un diámetro interno de 3.00 m y 107 m de longitud hasta el inicio de los ramales distribuidores. Adicionalmente será blindado el tramo de 20 m de la conexión con el pozo de la chimenea de equilibrio, que es de igual diámetro interior que el pozo de la garganta.

1.1.1.2.4 Ramales distribuidores

Los tres ramales distribuidores tienen un diámetro interno de 1.75 m, de longitudes variable de 26 m, 23 m y 32 m hasta la primera, segunda y tercera turbina, respectivamente, en el tramo final se reducen su diámetro interno a 1.60 m para su unión con las válvulas de guardia tipo mariposa. El tramo que alimenta a las dos últimas turbinas es de 2.45 m de diámetro y 12 m de longitud.

1.1.1.3 CASA DE MÁQUINAS DE SARAPULLO

Esta estructura es subterránea y consta de tres turbinas tipo Francis con una potencia nominal 16.3 MW cada una, para una caída neta de 138.30 m y un caudal de diseño de $13.33 \text{ m}^3/\text{s}$. La velocidad de rotación será de 450 rpm, la cota del eje de las turbinas es de 953 msnm y la contra carga máxima está dada por la cota del embalse Toachi 970.00 msnm. De igual manera tiene tres generadores de energía de 19 MVA, con un factor de potencia de 0.85 y su voltaje de generación de 13.8 KV.

1.1.1.4 OBRAS DE DESCARGA

1.1.1.4.1 Chimenea de equilibrio inferior

Tiene una cámara inferior de sección tipo baúl de 40m de longitud, 10m de ancho y 24 m

de altura, con la solera en la cota 953.00 msnm.

1.1.1.4.2 Túnel de descarga

Es de sección circular con un diámetro interno de 3.80m, longitud de 470.0m, revestido de hormigón hasta empatar con la obra de toma de la Presa Toachi que en su tramo inicial atraviesa longitudinalmente toda la Presa.

1.1.1.4.3 Patio de maniobras

El patio de maniobras es exterior y en él está ubicado el transformador de 60 MVA, 13.8/230 KV y el equipo necesario para la conexión a la Línea de Transmisión de 230 KV Sarapullo - Alluriquín.

1.1.2 APROVECHAMIENTO HIDROELÉCTRICO TOACHI – ALLURIQUÍN

Este es un aprovechamiento de 204 MW de potencia instalada, que explota una altura bruta de 145 m. y caudales de 40 m³/s. Está constituida por:

1.1.2.1 LA PRESA TOACHI Y SUS OBRAS ANEXAS

La presa es de hormigón a gravedad, con una altura de 59 m sobre el lecho del río. Su corona es de 170.50 m de longitud y 10.00 m de ancho y se encuentra en la cota 973 msnm. Los paramentos aguas arriba y aguas abajo son inclinados V:H= 1:0.3 y 1:0.7, respectivamente.

La presa está ubicada aguas abajo de la confluencia de los ríos Sarapullo y Toachi, produce un embalse de regulación diaria del caudal firme del Proyecto, de 2 millones de m³ entre sus niveles de operación máximo (970.00 msnm) y mínimo (965.00 msnm). El volumen total del embalse es de 8.0 millones de m³ el cual se extiende a 3.2 Km de río Toachi y a 1.3 Km del río Sarapullo.

La presa está constituida por 10 bloques, en los cuales 6 de ellos representan las estructuras hidráulicas principales como vertederos de excesos en los bloques No. 2 y 5, los desagües de fondo en los bloques No.3 y No.4 y el vertedero Sarapullo que se encuentra en el bloque No.6. Las obras anexas a la presa son: las ataguías y el túnel de desvío del río para su construcción, el canal de alimentación de la toma, la casa de control, la mini central hidroeléctrica a pie de presa y el estanque de disipación de energía de las descargas de las estructuras hidráulicas de control.

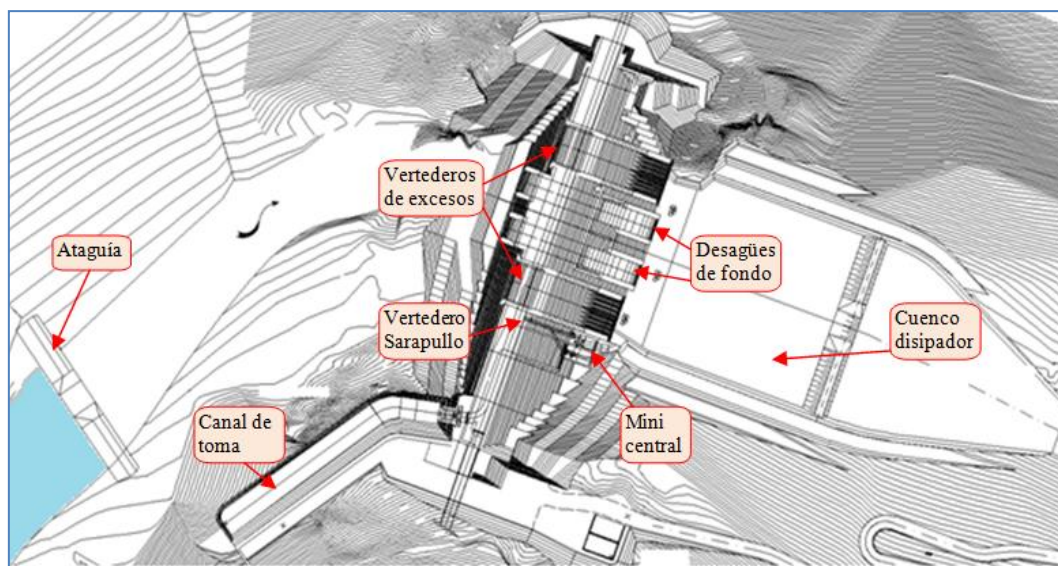


Figura No 1.3 Planta de la Presa Toachi y sus obras complementarias

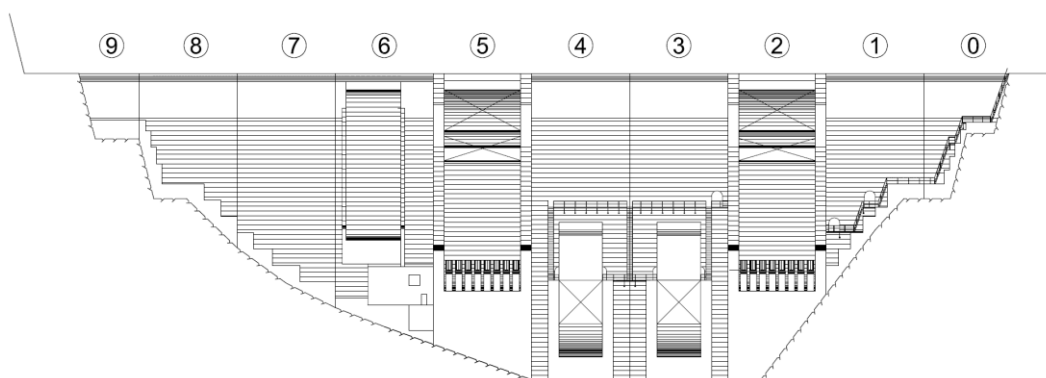


Figura No 1.4 Presa Toachi – Vista aguas abajo, subdivisión de los bloques²

1.1.2.1.1 Obras de desvío del río para la construcción de la presa

Estas obras están diseñadas para permitir la descarga de caudales de hasta $640 \text{ m}^3/\text{s}$, correspondiente a la crecida de 25 años. Por lo tanto las cotas de coronación mínimas de las ataguías aguas arriba y abajo son 945.00 y 935.00 msnm, respectivamente. El túnel de desvío es de sección tipo baúl de $B \times H = 8\text{ m} \times 9\text{ m}$, con pendiente del 1%, el mismo que cruza por la margen derecha del río.

1.1.2.1.2 Canal de alimentación de la toma

Se encuentra en la margen derecha delante de la toma. Tiene una sección trapecial de 8.0 m de base, 7.0 m de profundidad en la cabecera, una longitud de 100.0 m y pendiente del

² Hidrotoapi E.P “Proyecto hidroeléctrico Toachi- Pilatón . Presa Toachi. Hidráulica. Memoria de cálculo”. Quito.2009

4.5 %, esta se empotra longitudinalmente a la roca siguiendo la curvatura del terreno hasta la cota 973.00 msnm, en tanto que su margen izquierda, que es un muro libre, dispone de un vertedero a la cota 964.00 msnm.

El objeto de este canal es lograr que únicamente el agua que se encuentra en la capa superficial del embalse, que estará prácticamente libre de sedimentos, sea la que pase sobre el vertedero y alimente a la toma, es decir, a la casa de máquinas de Alluriquín.

1.1.2.1.3 Obra de Toma y conexión con el túnel de descarga de Sarapullo

La toma se encuentra ubicada en el paramento aguas arriba del bloque 8 de la presa. Está provista de rejillas y equipo limpia rejas. Su embocadura cambia de la sección inicial de $B \times H = 5.75 \text{ m} \times 7.85 \text{ m}$ a $3.50 \text{ m} \times 5.60 \text{ m}$, en donde dispone de una compuerta plana accionada por servomotor ubicado en la coronación de la presa. Inmediatamente después de la compuerta se une con la galería de interconexión, de las mismas dimensiones, que atraviesa longitudinalmente a la presa.

De igual forma en el bloque 8 se aloja al pozo que conecta a la descarga de Sarapullo con la galería de $B \times H = 2.0 \text{ m} \times 3.5 \text{ m}$, dispuesta al nivel 969.00 msnm, que a su vez se conecta con el vertedero.

1.1.2.1.4 Mini central al pie de presa

La casa de máquinas de la mini central de 1.4 MW turbinará el caudal ecológico del río Toachi que es el 10% de caudal medio diario o sea $4.14 \text{ m}^3/\text{s}$, se encuentra ubicada al pie de la presa, tiene una turbina tipo Francis de eje vertical, para una caída bruta de 42 m que provee el embalse.

1.1.2.1.5 Vertederos de excesos

Son dos vertederos tipo Creager ubicados en los bloques 2 y 5, la cota de su cresta está en 962.5 msnm., están diseñados para un caudal de crecida con período de recurrencia de mil años, de $965 \text{ m}^3/\text{s}$ y para una carga hidráulica de 7.50 m, el ancho de su estructura es de 14.0 m. Están controlados por compuertas de clapeta de $B \times H = 14.00 \text{ m} \times 7.50 \text{ m}$, con el objeto controlar el nivel máximo de operación del embalse.

La descarga de los vertederos se efectúa por medio de saltos de esquí, cuyo labio se encuentra a la cota 933.74 msnm y que están además dotados de 8 deflectores de 1.25 m de ancho con sus labios en la cota 936.92 msnm, que permitirán airear los chorros y lograr

una mejor disipación de energía en el aire antes de caer al cuenco disipador previsto aguas abajo de la presa.

1.1.2.1.6 Vertedero de descarga Sarapullo

El nivel de la cresta fija del vertedero se encuentra ubicado a la cota 969.50 msnm y el ancho es de 6.5 m. La rápida es de tipo escalonado, lo que permite una buena disipación de energía. Las dimensiones de los escalones son de 0.75 m de alto y 0.52 m de ancho. Está diseñado para un caudal de $40\text{m}^3/\text{s}$, con una carga de agua de 1.88 m.

1.1.2.1.7 Desagües de fondo

Son dos y se encuentran ubicados en los bloques 3 y 4, la cota de la cresta está en 927.00 msnm, estos tendrán la capacidad para descargar hasta alrededor de $800\text{ m}^3/\text{s}$ libres de sumersión. Se encuentran controlados por compuertas radiales de $B \times H = 8.0\text{ m} \times 8.0\text{ m}$. La descarga de los desagües de fondo se efectuará por medio de saltos en esquí de 15 m de radio cuya cota del esquí en 921.94 msnm.

1.1.2.1.8 Estanque disipador de energía

El estanque disipador de energía se encuentra aguas abajo de la presa, delante de la escollera que tiene una extensión de 10 m la misma que protegerá a la presa por medio de enrocado de grandes piedras entrelazadas entre ellas con cables. El estanque es de aproximadamente 70 m de ancho y 65 m de longitud, conformado por medio de excavaciones laterales en las dos márgenes del río y por la construcción de un umbral de escollera encementada que tiene una abertura que descargará los caudales al canal de transición de unos 80 m de longitud hasta su unión con el río.

1.1.2.1.9 Galería de interconexión entre los dos aprovechamientos

Esta galería de interconexión atraviesa longitudinalmente la presa, sus dimensiones son $B \times H = 3.50\text{ m} \times 5.60\text{ m}$, sirve para conectar el túnel de descarga de la casa de máquinas de Sarapullo con el túnel de presión Toachi-Alluriquín.

1.1.2.2 OBRAS DE CONDUCCIÓN

1.1.2.2.1 Túnel de presión

Se inicia en la cota 952.00 msnm al final de la galería de interconexión de los dos aprovechamientos, que atraviesan la presa. Será de sección interna circular, de 5.60 m de

diámetro. La longitud del túnel es de 8.65 Km hasta el inicio del blindaje de acero de la tubería de presión, con la cota 779.50 msnm.

1.1.2.2.2 Chimenea de equilibrio superior

La chimenea de equilibrio se ubica 38.0 m aguas abajo del inicio de la tubería de presión y está desplazada 20 m del eje de la conducción. Está compuesta por un pozo vertical inferior (garganta) con un diámetro interior útil de 3.50 m hasta la cota 905.00 msnm; y, a partir de este, el pozo principal de la chimenea es de 15.00 m de diámetro, hasta el nivel 1014.00 msnm, en donde sale a la superficie. Toda la chimenea será revestida de hormigón, la garganta con 0.35 m y el pozo principal con 0.55 m.

1.1.2.2.3 Tubería de presión

El ramal principal es de 4.70 m de diámetro interno y 180 m de longitud hasta el inicio de los ramales distribuidores. Será blindada con acero, embebido en el revestimiento de hormigón de 0.60 m de espesor.

1.1.2.2.4 Ramales distribuidores

Los tres ramales distribuidores de acero son de 2.70 m de diámetro interno, de 21 m, 17 m y 28 m de longitud hasta la primera, segunda y tercera turbina, respectivamente, en cuyo tramo final se reducen a 2.60 m para su unión con las válvulas de guardia tipo mariposa.

1.1.2.2.5 Casa de máquinas de Alluriquín

La casa de máquinas es subterránea de dimensiones: $L \times B \times H = 66 \text{ m} \times 24 \text{ m} \times 45 \text{ m}$, tiene tres turbinas tipo Francis con potencia nominal por unidad de 68 MW, para una caída neta de 231 m y caudal de diseño de $33.33 \text{ m}^3/\text{s}$. Su velocidad de rotación será de 300 rpm; la cota del eje de las turbinas es 732.00 msnm y la contra carga está dada por la cota de restitución al río 737.00 msnm.

1.1.2.3 OBRAS DE DESCARGA

1.1.2.3.1 Chimenea de equilibrio inferior

Esta tiene una cámara inferior sección tipo baúl de área útil $L \times B \times H = 41 \text{ m} \times 10 \text{ m} \times 36 \text{ m}$, con la solera a la cota 722,40 msnm.

1.1.2.3.2 Túnel y estructura de descarga

El túnel es de sección circular, con diámetro interno de 5.60 m, y 504 m de longitud, revestido de hormigón hasta empatar con la estructura de descarga.

Sus cotas inicial y final son 722.00 y 732.00 msnm. La estructura de descarga está constituida por una transición de 26 m de longitud entre el túnel y el azud-vertedero de 21 m de ancho, cuya cresta se encuentra a la cota 736 msnm y permitirá la restitución de los caudales turbinados al río Toachi.

1.1.2.3.3 Subestación Alluriquín

La subestación es exterior y está ubicada entre el carretero y el río. Es del tipo SF6 y permitirá la conexión del Proyecto con las Líneas del Sistema Nacional Interconectado. El patio de maniobras es exterior y en él está ubicado el transformador de 13.8/230 KV y el equipo necesario para la conexión a la Línea de Transmisión de 230 KV Sarapullo-Alluriquín.

1.2 GENERALIDADES SOBRE EL PLAN DE OPERACIÓN DEL SISTEMA EN SU DISEÑO ORIGINAL

Una vez que se capta los 40.0 m³/s del río Pilatón, estos son transportados a través del túnel de presión Pilatón – Sarapullo de 5.9 km de longitud hasta llegar a ser turbinados en la central Sarapullo de 49MW de potencia instalada, luego este caudal es transportado por un túnel de descarga hasta empatar con la obra de toma de la presa Toachi que capta 60.0 m³/s, obteniendo un total de 100m³/s mediante la estructura de interconexión que se encuentra en el bloque 8 y atraviesa longitudinalmente la presa Toachi, la misma que conecta hidráulicamente el túnel de descarga Sarapullo con el túnel de presión Toachi – Alluriquín, con el objeto de que las aguas limpias turbinadas en Sarapullo alimenten directamente a la central Alluriquín de 204 MW de potencia instalada, evitando así su descarga en el embalse. En caso de que Alluriquín esté fuera de servicio en el mismo bloque existe una compuerta plana que desconecta la interconexión con la descarga Sarapullo y a su vez conectándose mediante un pozo con la galería ubicada en la cota 969 msnm y esta con el vertedero de descarga escalonado Sarapullo de 6.5m de ancho.

El funcionamiento de los vertederos de excesos de la presa Toachi es controlado por compuertas tipo clapetas las mismas que ayudan a controlar el nivel máximo de operación del embalse 970.0 msnm garantizando que la toma capte los 60.0 m³/s, estas clapetas serán abatidas en escenarios especiales en donde existan crecidas de caudales del río. Los

desagües de fondo funcionan con compuertas radiales, estos se operan simultáneamente con sus compuertas abiertas en su totalidad para garantizar una mayor eficiencia en el arrastre del material sólido depositado en el embalse.

1.3 RESTRICCIONES EN EL DIMENSIONAMIENTO HIDRÁULICO DEL SALTO EN ESQUÍ

Los saltos en esquí se los utiliza para grandes descargas, principalmente en los vertederos cuya descarga se hace directamente sobre el río. Se utilizan deflectores para hacer saltar el flujo hacia un punto aguas abajo reduciendo así la erosión en el cauce y al pie de la presa. La trayectoria del chorro depende de la descarga, de su energía en el extremo y del ángulo con el que sale del esquí. Estos están diseñados para producir una disipación eficiente mediante la perturbación de la corriente de agua ya sea aumentando su turbulencia o su difusión en el aire.

En este tipo de estructuras de disipación de energía se debe poner mucha atención a las condiciones de aproximación al vertedero y a la calidad de disipación y la restitución de las aguas al río.

Las limitaciones en el dimensionamiento hidráulico de los saltos en esquí consiste en la evaluación adecuada del efecto del chorro como alcance, dirección y forma, para de esta manera saber si las condiciones topográficas locales cumplen las expectativas para la formación del cuenco amortiguador, de igual forma la geología también tiene un papel importante puesto que conoceremos si el material del lecho y de los taludes del cuenco es el adecuado para soportar los efectos de la erosión producto del impacto del chorro. Por otro lado la acción del chorro conduce a una sobreelevación del nivel libre de agua hacia aguas abajo, por efecto de la turbulencia generada y un nivel más bajo hacia aguas arriba por efecto de succión. Este desnivel es el causante de las fluctuaciones y recirculación no deseables de la superficie libre dentro del cuenco preexcavado, este desnivel es directamente proporcional a la energía específica en la zona del impacto, de tal forma para no tener tanta variación en el nivel de la superficie se provoca la dispersión del chorro ampliando el área de impacto.³

³ Arguello, W."Estudio experimental sobre el chorro de salida y la eficiencia del cuenco amortiguador al pie de un salto en esquí y su aplicación en el proyecto Misbaque". Quito 1991.Tesis de grado. Facultad de Ingeniería Civil.EPN

1.4 REQUERIMIENTOS PARA LA INVESTIGACIÓN EXPERIMENTAL

Tomando como referencia los resultados obtenidos en la fase 1 y fase 2 del “Estudio Experimental de la Presa Toachi y Obras Complementarias” realizado en el modelo físico existente en el laboratorio del CIERHI, escala 1:50, la EPN recomendó incrementar el ancho y la longitud del cuenco previsto aguas abajo de la Presa Toachi para garantizar la disipación de energía en todo el rango de caudales de operación previstos para los vertederos de excesos, desagües de fondo y vertedero de descarga Sarapullo. Sin embargo, las condiciones geológicas de la margen derecha no permiten el ensanchamiento mínimo recomendado, por lo tanto esta investigación experimental evaluará cualitativamente alternativas de los deflectores en el esquí de los vertederos de excesos, analizando el comportamiento hidráulico principalmente en el cambio de la dirección del chorro lanzado desde el esquí, buscando orientar el mismo hacia el centro del cuenco de disipación de tal forma de que las fosas de socavación se conformen alejadas de los taludes laterales.

Para la investigación de las diferentes alternativas geométricas al pie de los vertederos de excesos de la presa Toachi el modelo físico tiene que cumplir ciertas condiciones que favorecen a una mejor compatibilidad entre el prototipo y el modelo como:

- Criterios de similitud que gobiernen el fenómeno analizado garantizando la semejanza entre prototipo y modelo.
- Espacio físico disponible en el laboratorio para la implementación del modelo.
- El caudal máximo y mínimo disponible en el sistema de alimentación.
- Niveles o calados mínimos sobre los vertederos de excesos para descartar los efectos de tensión superficial y viscosidad para obtener valores más cercanos al prototipo.
- Escala o relación de magnitudes, donde las dimensiones de los vertederos de excesos y deflectores a la salida de los mismos satisfagan con el criterio de similitud.

1.5 OBJETIVO GENERAL DEL ESTUDIO

Analizar experimentalmente el alcance y la dirección del chorro a la salida de los vertederos de excesos de la presa Toachi con diferentes alternativas geométricas de deflectores para lograr su direccionamiento hacia el centro del cuenco disipador.

1.6 OBJETIVOS ESPECÍFICOS DEL ESTUDIO EN MODELO FÍSICO

- Verificar el funcionamiento hidráulico de las alternativas implementadas para lograr el cambio de dirección del chorro a la salida de los deflectores.
- Evaluar la dirección, forma y alcance de los chorros de la descarga desde los deflectores al pie del vertedero de excesos de la presa.
- Analizar como varían las características hidrodinámicas de los chorros lanzados desde los deflectores con diferentes caudales de ingreso.
- Analizar y comparar los resultados obtenidos entre las alternativas propuestas.

CAPÍTULO II

2 DESCRIPCIÓN DEL FENÓMENO FÍSICO Y ANÁLISIS TEÓRICO DISPONIBLE

2.1 RESUMEN DE LA TEORÍA SOBRE EL CHORRO DE SALIDA DEL SALTO EN ESQUÍ

Cuando la descarga de los vertederos puede hacerse directamente sobre el río, el chorro se proyecta lejos de la estructura por medio de un deflector terminal o trampolín. El agua en estas estructuras sale como un chorro libre y cae en el cauce a una distancia del extremo del vertedor. La trayectoria del chorro depende de la energía del flujo en el extremo y del ángulo con el que el chorro sale del trampolín.

Los saltos en esquí como se observa en la figura No.2.1 tienen la función principal de disipar energía mediante la difusión del chorro de agua lanzado en el aire que se da en principio por la inclusión de aire, si esta alcanza un grado donde la corriente se transforma en una pulverización la disipación puede ser significativa, estas estructuras provocan que cada partícula del fluido en movimiento pierdan parte de su energía hidráulica a lo largo de su trayectoria como resultado del contacto o resistencia aire-agua, por la turbulencia del agua y por las fuerzas de fricción del flujo con el cauce del río.

Parte de la energía del chorro es disipada en el aire por lo tanto los saltos en esquí son expresamente diseñados para desparramar el flujo de alta velocidad (superior a los 20m/s) saliente de la rápida, de tal modo que el aire circundante puede atacar la mayor área posible y mover el impacto erosivo del agua fuera del pie de la estructura.

El deflector debe estar por encima del nivel máximo de agua en el cuenco amortiguador con el fin de evitar que el material suelto entre en el esquí en donde puede existir deflectores, por lo que provocaría abrasión de los mismos, además daños por cavitación debido a las fluctuaciones sumergidas. Este tipo de disipación de energía hidráulica se utiliza para grandes descargas, permitiendo importantes chorros en sitios donde las condiciones geológicas y morfológicas sean favorables.

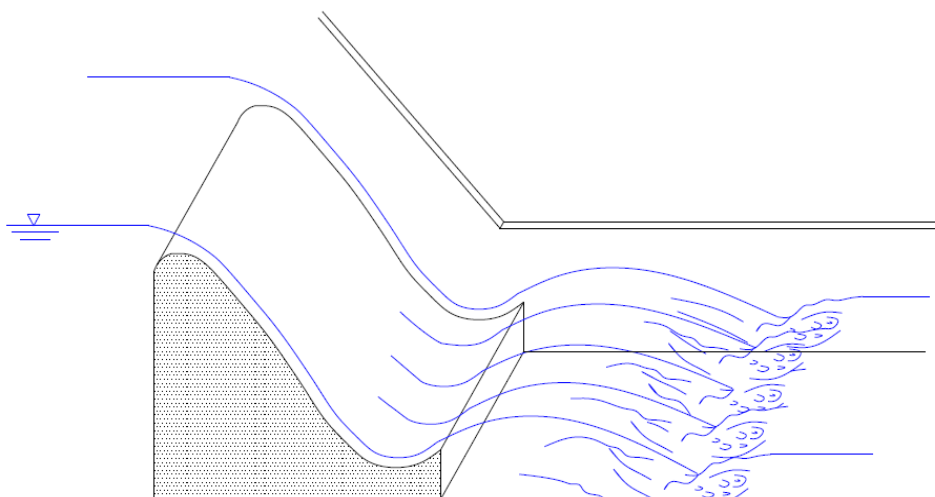


Figura No 2.1 Dissipador tipo salto esquí

Otra forma de disipación de energía de los saltos en esquí es cuando funcionan sumergidos, debido a que el calado del colchón aguas abajo sumerge al esquí, en la cual la disipación se manifiesta por la formación del resalto hidráulico en la superficie del esquí.

El uso de los dissipadores de esquí sumergidos puede ser perjudicial debido al desgaste que produce a las superficies de concreto, causado por el material que regresa a lo largo del borde del deflector debido al remolino en el fondo.

En la figura No.2.2 se puede observar el comportamiento aguas abajo del esquí sumergido.

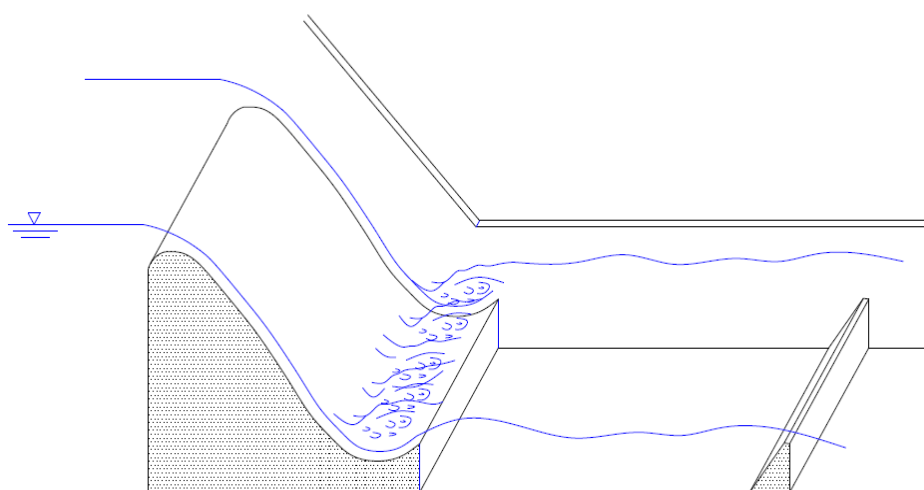


Figura No 2.2 Dissipador tipo salto esquí sumergido

Los deflectores del diseño original de los vertederos de excesos presentados por la empresa “Hidrotoapi”, son saltos en esquí tipo estriado los cuales contienen estrías o ranuras en el deflector obligando a romper la parte inferior del flujo compacto de aproximación,

formándose varios chorros unos inferiores que parten desde el cucharón del esquí con un ángulo menor y otros superiores lanzados desde las crestas de los deflectores que presentan un ángulo de salida mayor. De esta forma se produce una turbulencia menor en la superficie del vertedero evitando así su erosión.⁴ Este tipo de dissipador es más eficiente que el dissipador esquí liso, ya que la corriente de agua es dividida por las estrías acelerando la dispersión de energía, el dissipador tipo esquí estriado puede o no ser sumergido dependiendo de las profundidades del cauce, su esquema se muestra en la figura No.2.3

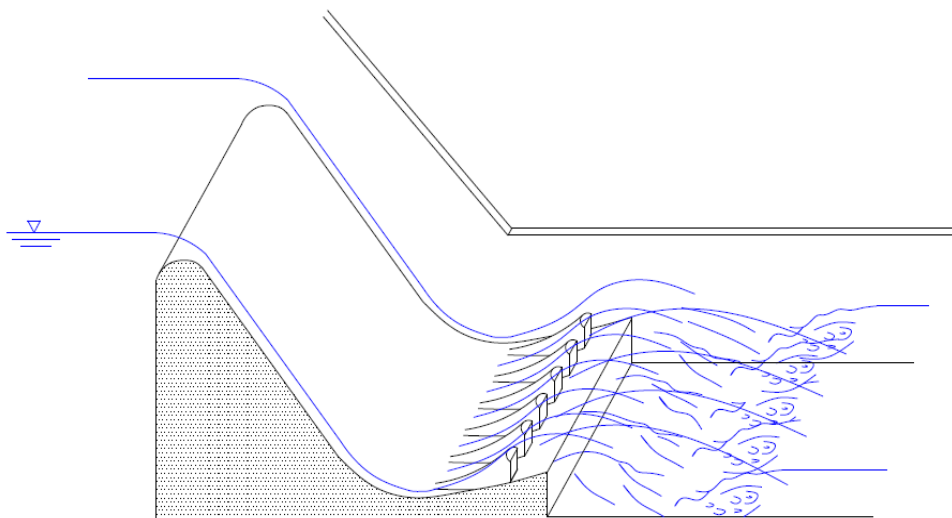


Figura No 2.3 Dissipador tipo salto esquí estriado

El artículo de Li Guifen y Wang Lianxiang, llamado “Nuevos tipos de dissipadores de energía para mitigar los efectos ambientales en la descarga de crecidas en grandes presas”, tenemos que en el proyecto Dongjiang, se usó un jet tipo hendidura con contracciones laterales al final del jet (figura No 2.4), este tipo de dissipador produce una salida del flujo en forma vertical, y la descarga cae en una amplia área de incidencia aguas abajo.⁵

La relación del ancho final y el inicial, que define la contracción del jet, depende del caudal y la carga de agua, que se debe elegir una relación apropiada para el estrechamiento, ya que relaciones demasiadas pequeñas o grandes, producen patrones desfavorables del flujo, lo que provoca una menor eficiencia en la dissipación de energía y daños al medio circundante.

⁴U.S.B.R.(Bureau of Reclamation),USA “Diseño de Presas pequeñas”.pág. 331

⁵ Molina D.,Guevara J. “Análisis experimental de la dissipación de energía en cimacios con perfil liso y escalonado”. Quito 2010. Tesis de grado. Facultad de Ingeniería Civil-EPN

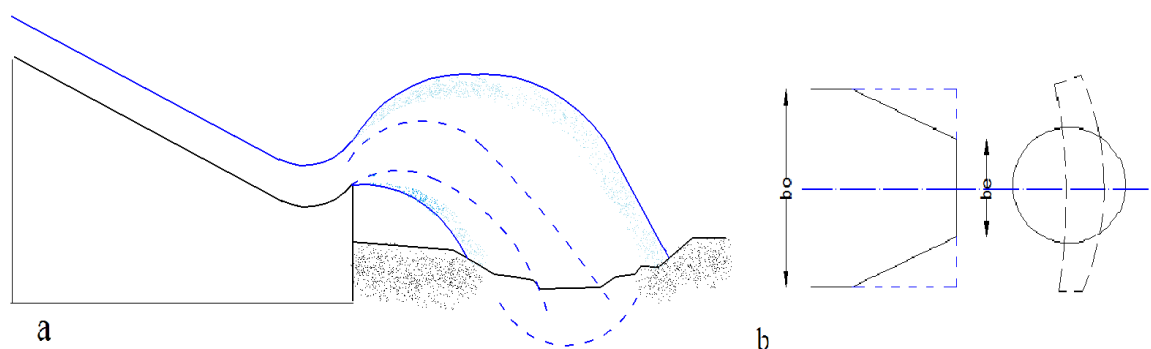


Figura No 2.4 Jet tipo hendidura; (a) Vista longitudinal (b) Vista en planta

El proceso de disipación del chorro termina cuando el chorro ingresa a la masa de agua del cuenco de disipación, aun con un porcentaje de energía sin disipar, energía que se consume al producir turbulencia en el cuenco y finalizando así el proceso de disipación. Sin embargo el impacto directo del chorro sobre el lecho rocoso provoca fracturas en la roca formando una fosa de socavación y dunas de material aguas abajo, que pueden poner en riesgo la estabilidad de la presa y de los taludes por la recirculación del flujo. Se realiza estudios en modelo para estimar la profundidad de dicho cuenco.

2.1.1 DESINTEGRACIÓN DEL CHORRO EN EL AIRE

Para conseguir la disipación de energía se necesita la formación de un chorro que se desintegre considerablemente en el aire. El flujo de aproximación que llega al vertedero es lanzado hacia el aire por el cucharón y una gran cantidad de agua pulverizada cae en la superficie del agua en la zona de descarga aguas abajo de la estructura. El estudio en modelo hidráulico que se realiza en el laboratorio de hidráulica del CIERHI, está limitado por la escala, lo que incide en los efectos de tensión superficial y viscosidad sobre el flujo.⁶

Este proceso está influenciado por la geometría del cucharón, curvatura, turbulencia en la aproximación, la acción del viento y las propiedades del flujo. La gran cantidad de parámetros que influyen en el proceso de la desintegración del chorro líquido en contacto con el aire hacen que se disponga de limitada información disponible, sin embargo existen varias recomendaciones como:

- Sección transversal del chorro no debe ser circular para evitar la concentración del chorro.

⁶ Visher, D., Hager, W. "Dam Hydraulics " .1998

- Transición desde la rápida hacia el cucharón debe ser brusca para no estrechar el chorro en el aire.
- Chorro desigual para incrementar la turbulencia, pero considerando el riesgo de cavitación en el cucharón.
- Ingreso de aire al chorro y creación de mezcla aire-agua en la descarga.

2.1.2 DISEÑO DEL SALTO EN ESQUÍ

Este elemento debe operar para todos los caudales y soportar cargas de presión estáticas y dinámicas. La forma comúnmente es un arco circular de radio de 10m a 20m, ángulo de salida α entre 20 y 40 grados. Si el radio es muy pequeño podría producirse excesiva salpicadura, vibraciones o superficies de agua con trayectorias erráticas. De igual forma si el nivel de salida es alto, la velocidad de despegue no será la suficiente para lograr la dispersión del chorro y a su vez el alcance sería muy corto.⁷

Cuando se operen caudales relativamente pequeños existe el riesgo de provocar un efecto abrasivo en el esquí debido al constante reingreso de agua dentro de la estructura.

Los parámetros geométricos requeridos para el diseño de un deflector dispersor de energía⁸ son el radio de curvatura (r), la altura mínima del labio (h_{\min}) y el ángulo de salida de la trayectoria (α).

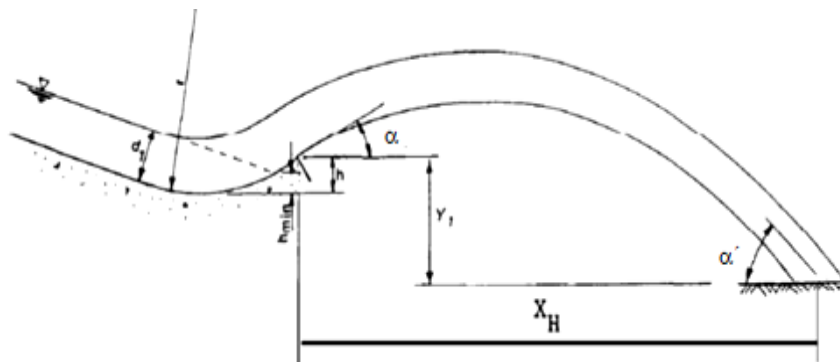


Figura No 2.5 Parámetros para el diseño de salto en esquí⁹

2.1.2.1 RADIO MÍNIMO

Es el mínimo radio de curvatura que puede tener el esquí, para que posteriormente el flujo despegue hacia arriba y así evitar que existan trayectorias erráticas y excesivas salpicaduras del agua.

⁷ Visher, D., Hager, W. "Dam Hydraulics". 1998

⁸ Whittaker, J. "Scour Related to Energy Dissipators for Head Structures." Zurich. 1984. 73 p.

⁹ Whittaker, J. "Scour Related to Energy Dissipators for Head Structures." Zurich. 1984. 73 p.

$$r_{\min} = \frac{\rho V_1^2 h_1}{P_T - \gamma d_1} \quad (\text{m}) \quad (2.1)$$

Donde:

ρ = Densidad del agua (Kg/m^3).

V_1 = Velocidad del flujo (m/s).

h_1 = Profundidad del flujo (m).

P_T = Unidad de carga específica en la solera del esquí (Kg/m^2).

γ = Peso específico del agua (Kg/m^3).

Como guía de diseño general el radio debe ser al menos igual a cuatro veces la profundidad del flujo máximo.

2.1.2.2 ALTURA MÍNIMA

Para tener un correcto flujo, la altura del esquí debe ser al menos lo suficientemente alta como para interceptar la pendiente hacia adelante proyectada de la superficie del agua en el punto de curvatura del vertedero y la curva del esquí como se observa en la figura No.2.5, de esta manera se garantiza dirigir el chorro lejos de la estructura.

Se recomienda que el nivel del labio del esquí este siempre por encima del nivel máximo de agua en la zona de descarga de la estructura para evitar que el material ingrese empezando un proceso de desgaste, y prevenir la cavitación debida a fluctuaciones de sumergencia.

$$h_{\min} = r - r \cos(\phi - \tan^{-1} s) \quad (\text{m}) \quad (2.2)$$

Donde:

s = Pendiente de la rápida (m/m).

ϕ = α ángulo de salida del esquí con la horizontal ($^\circ$).

En la figura No.2.6 se observa las medidas recomendadas según la Bureau of Reclamation para obtener un diseño eficiente de un salto en esquí tanto para un deflector liso como para un deflector estriado¹⁰

¹⁰ U.S.B.R.(Bureau of Reclamation),USA “Diseño de Presas pequeñas”. pág. 332

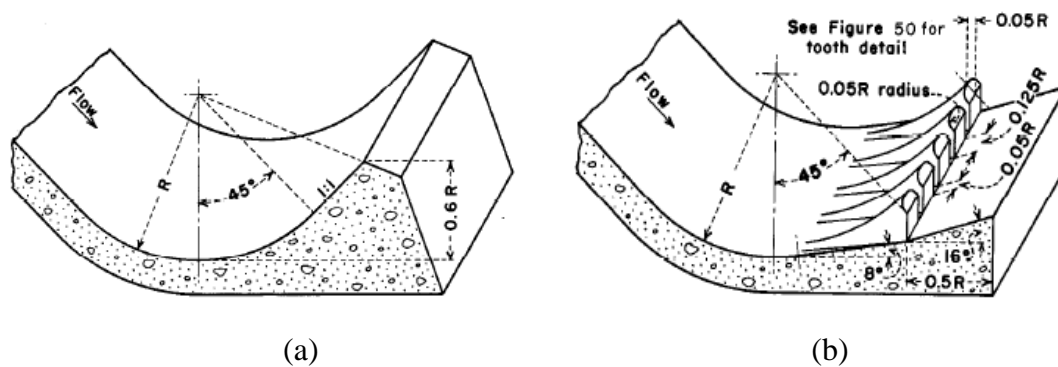


Figura No 2.6 Medidas recomendadas para deflectores, lisos(a) y estriado (b)

2.1.2.3 ÁNGULO DE TRAYECTORIA

Es el ángulo a la salida del esquí formado con respecto a la horizontal. Este ángulo es un factor importante para determinar el alcance de la trayectoria de chorro y las características generales hidráulicas en el área de impacto. Su ecuación se presenta a continuación.

$$\alpha = \tan^{-1} \left\{ \frac{[d_1 (2r - d_1)]^{0.5}}{r - d_1} \right\} \quad (^\circ) \quad (2.3)$$

Donde:

d_1 = Carga en el perfil del vertedero (m).

2.1.2.4 ÁNGULO DE IMPACTO O INCIDENCIA

Este es el ángulo con el que el chorro impacta en el colchón de aguas, se forma entre la trayectoria del chorro y la horizontal del nivel del colchón de aguas en la zona de impacto. Su ecuación está representada por:

$$\alpha' = \tan^{-1} \left\{ \sec \alpha \left(\sin^2 \alpha + \frac{z_3}{h_e} \right)^{0.5} \right\} \quad (^\circ) \quad (2.4)$$

Donde:

h_e = Altura de velocidad en el labio del esquí (m).

z_3 = Es el desnivel que existe desde la cresta del esquí hasta el nivel aguas abajo del impacto del chorro (m).

Este ángulo es uno de los parámetros que se utiliza para determinar la profundidad y configuración de las fosas de socavación.

2.2 ALCANCE Y CONFIGURACIÓN DEL CHORRO DE SALIDA DEL SALTO EN ESQUÍ

Probablemente la consideración más importante en el diseño de saltos en esquí, es el determinar que tan lejos puede ser lanzado el chorro aguas abajo. La geometría de la trayectoria del chorro se puede aproximar a una parábola que tiene como origen el labio del deflector que corresponde a las coordenadas (x, z), teóricamente si se desprecia la fricción o resistencia del aire y la separación del chorro.¹¹

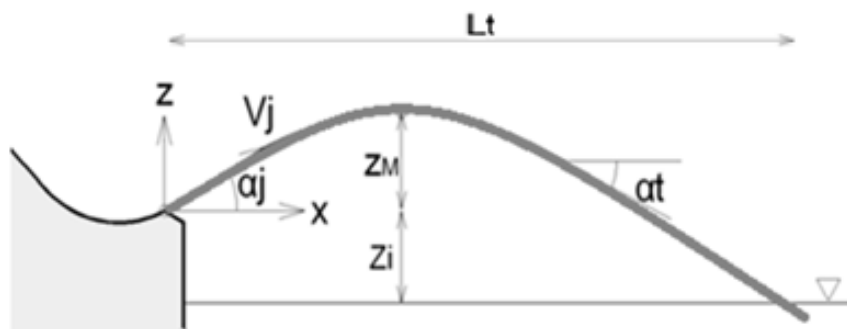


Figura No 2.7 Definición de la trayectoria del chorro

Por lo tanto la ecuación de la trayectoria parabólica se define como

$$z = \tan\alpha_j x - (gx^2/2V_j^2 \cos^2\alpha_j) \quad (2.5)$$

Donde:

z= Componente vertical (m).

α_j = Ángulo de salida (°).

x = Componente horizontal (m).

g=Aceleración de la gravedad (m/s^2).

V_j = Velocidad en la salida del salto en esquí (m/s).

Teóricamente el alcance máximo debería ser cuando ángulo α_j es 45 grados, pero en la realidad el ángulo óptimo de despegue α_j oscila entre 20 grados y 40 grados.

Sí se considera que $H_j = V_j^2/2g$ como carga de velocidad a la salida con V_j siendo la velocidad a la salida del cucharón, las coordenadas x_M y z_M de la ubicación de la altura máxima son:

¹¹ Heller Valentin, Hager William H., F.ASCE, and Hans-Erwin Minor. "Ski Jump Hydraulics." Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 131, No. 5. 2005. Pág. 347-355

$$x_M/H_j = 2\text{sen}\alpha_j\cos\alpha_j \quad (2.6)$$

$$z_M/H_j = \text{sen}^2\alpha_j \quad (2.7)$$

La longitud de trayectoria o alcance del chorro L_t es:

$$L_t/H_j = 2\text{sen}\alpha_j\cos\alpha_j \left[1 + \left(1 + (z_i/H_j\text{sen}^2\alpha_j) \right)^{1/2} \right] \quad (2.8)$$

Para valores pequeños de z_i/H_j y ángulos grandes la ecuación 2.8 se simplifica a la expresión siguiente:

$$L_t = 2x_M + (z_i/\tan\alpha_j) \quad (2.9)$$

Donde:

z_i = Altura relativa de impacto a la salida del salto en esquí (m).

Un chorro con salto en esquí aumenta su anchura a medida que viaja a través de la atmósfera. La expansión transversal del chorro β_j varía entre 5 y 10° como se observa en la siguiente figura No.2.8

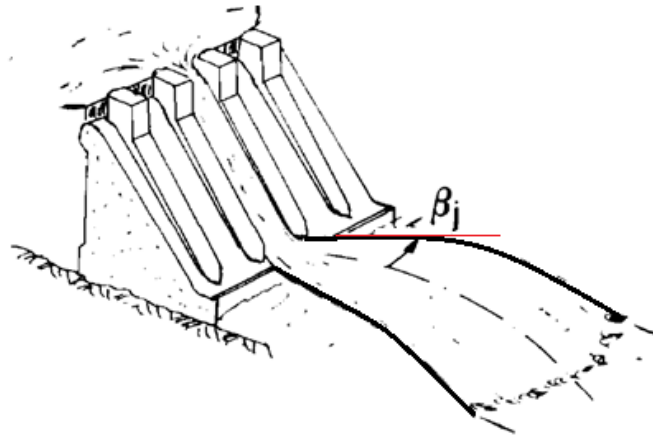


Figura No 2.8 Distribución transversal del chorro

Esta expansión transversal se define como:

$$\tan \beta_j \cong 1.05(h_b/z_b)^{1/2}/\tanh(6\bar{q}^{1/3}) \quad (2.10)$$

$$\bar{q} = q/(gL_s^3)^{1/2} \quad (2.11)$$

Donde:

q =Caudal unitario ($\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$).

L_s = Longitud del vertedero (m).

z_b = Distancia entre el labio del deflector y la superficie libre en la aproximación (m).

Los factores como el espesor y el tamaño del chorro y su nivel inicial de turbulencia juegan roles importantes en la manera como el chorro es dispersado a pequeñas gotas cuando está en el aire.

2.3 RESUMEN DE LA LITERATURA TÉCNICA DISPONIBLE

Se tienen varias ecuaciones encontradas en base de modelos hidráulicos y mediciones hechas en prototipo que permiten calcular el alcance máximo y altura del chorro, entre ellas se menciona las siguientes:

2.3.1 ECUACIÓN DE ELEVATORSKY¹²

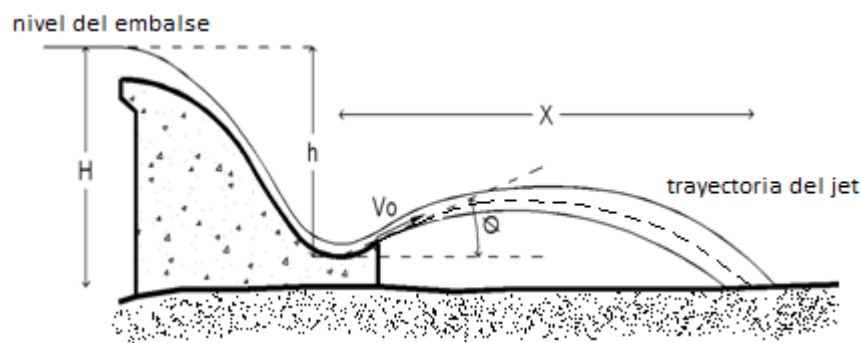


Figura No 2.9. Trayectoria del chorro según Elevatorsky

Mediciones realizadas por Maitre y Obolensky, determinaron que para flujos menores que la mitad de la descarga máxima muestran aproximadamente que el 19% a 20% de la energía total se disipa por la interacción del chorro con aire. Con el objeto de compensar la reducción de velocidad y pérdida de energía del chorro durante su trayectoria por efecto de la interacción del chorro con el aire se sugiere la siguiente ecuación para el alcance máximo:

$$x = 1.9(h)\text{sen}2\theta \quad (2.12)$$

Donde :

X = Alcance del chorro en la dirección horizontal (m).

H = Carga hidráulica entre el fondo del cucharón y el nivel aguas arriba del vertedero (m).

¹² Elevatorsky, Edward A.. "Hydraulic energy dissipaters". McGraw Hill book company. New York 1959. Pág 178.

\emptyset = Ángulo a la salida del deflector ($^{\circ}$).

El salto en esquí se diseña para ángulos comprendidos entre 20 y 40 grados respecto de la horizontal. Si el ángulo es mayor que 40 grados durante la operación de pequeños caudales se produce la formación de estancamiento del flujo en el deflector que genera ondas repetitivas de carácter abrasivo.

Para determinar la componente vertical “y” (altura del chorro), si se desprecia la resistencia del aire y la desintegración del chorro se usa la expresión:

$$\frac{y}{h} = \text{sen}^2 \emptyset \quad (2.13)$$

2.3.2 ECUACIÓN DE KAWAKAMI¹³

Según Kawakami, el alcance del impacto del chorro L_0 si se desprecia la resistencia del aire es:

$$L_0 = (V_0^2/g)\text{sen}2\emptyset \quad (2.14)$$

Donde:

L_0 = Alcance del chorro (m).

V_0 =Velocidad en la salida del salto de esquí (m/s).

g =Aceleración de la gravedad (m/s^2).

\emptyset = Ángulo a la salida del deflector ($^{\circ}$).

Tomando en cuenta la resistencia del aire, Kawakami tras algunas investigaciones de las trayectorias del chorro con vertedero en salto en esquí desarrollo un gráfico, ubicando L_1/L_0 en las ordenadas, siendo L_1 el alcance máximo del chorro considerando la resistencia del aire, y en las abscisas la velocidad del flujo de salida en m/s. Esta gráfica se presenta en la siguiente figura.

¹³ Novak, P. “Developments in Hydraulic engineering”. Vol 2 EASP. New York.1984

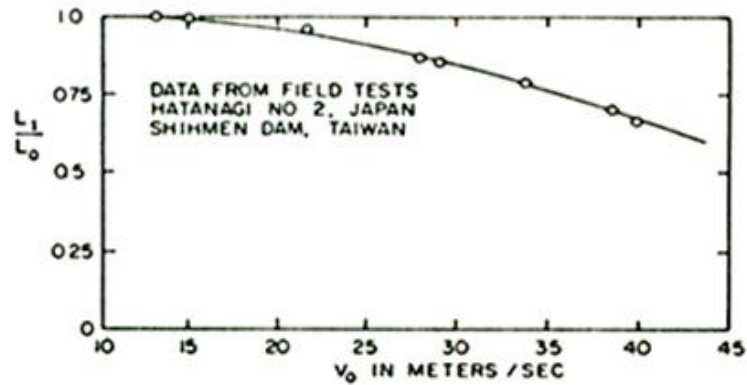


Figura No 2.10 Ábaco de Kawakami, efecto de la resistencia del aire¹⁴

2.3.3 ECUACIÓN DE LA U.S.A CORPS OF ENGINEERS¹⁵

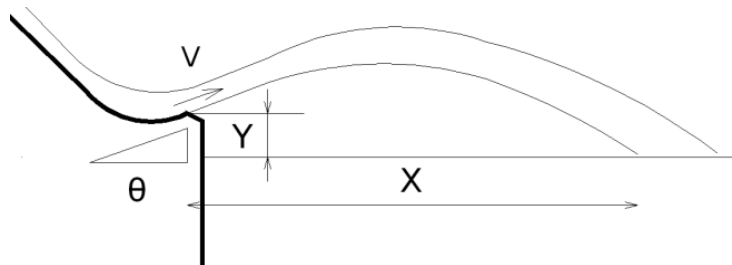


Figura No 2.11 Trayectoria del chorro según U.S.A. Corps of Engineers.

El alcance del chorro se calcula como:

$$X/H_v = \sin 2\theta + 2\cos\theta \sqrt{(\sin^2\theta + (Y/H_v))} \quad (2.15)$$

Donde

X = Alcance del chorro (m).

H_v = Carga de velocidad en el labio (m).

θ =Ángulo de salida (°).

Y = Distancia entre el labio y la superficie libre de la descarga (m).

2.3.4 ECUACIÓN HIDROTOAPI E.P.¹⁶

La trayectoria del chorro hacia aguas abajo de la presa lanzado por el salto en esquí, se puede obtener considerando una masa puntual lanzada en el aire con una inclinación y una velocidad inicial. Despreciando la resistencia del aire sobre el chorro, la trayectoria resulta.

¹⁴ Novak, P. "Developments in Hydraulic engineering". Vol 2 EASP. New York.1984

¹⁵ U.S.A. Corps of engineers. "Hydraulic design criteria". Sheet 112-8.

¹⁶ Hidrotoapi E.P "Proyecto hidroeléctrico Toachi- Pilatón . Presa Toachi. Hidráulica. Memoria de cálculo ". Quito.2009

$$z = \tan\delta x - (g x^2 / 2v^2 \cos^2\delta) \quad (2.16)$$

Donde:

z = Componente vertical (m).

δ = Ángulo de salida del salto en esquí con respecto a la horizontal (°).

x = Componente horizontal (m).

g = Aceleración de la gravedad (m/s^2).

v = Velocidad en la salida de la vena hidráulica salto en esquí (m/s).

El origen del sistema de ejes ($x=0, z=0$) se refiere al labio de descarga del salto de esquí.

La difusión del chorro en el aire puede evaluarse considerando un ángulo de abertura de alrededor de 2 grados a 3 grados con respecto de la trayectoria determinada por la ecuación (2.16).

2.4 CONCLUSIONES

1. Existen varias ecuaciones como: Visher Hager, Elevatorsky, Kawakami, Corps of engineers y Trayectoria parabólica para la estimación de las características hidrodinámicas (alcance y altura) de los chorros lanzados por saltos en esquí, las cuales arrojan resultados aproximados a la realidad puesto que estas ecuaciones son obtenidas mediante hipótesis empíricas para condiciones particulares, es por eso hacer uso de la modelación física, con la cual podríamos tomar mejores decisiones para el diseño.
2. El tipo de dissipador ranurado es el más eficiente ya que la corriente de agua compacta es dividida por las estrías acelerando la disipación de energía y así disminuir su efecto erosivo en el cuenco de socavación.
3. El proceso de desintegración del chorro está influenciado por la geometría del cucharón, curvatura, turbulencia de aproximación, la acción del viento y las propiedades del flujo.
4. Elevatorsky y Kawakami son los únicos autores que consideran porcentajes de pérdidas debido a la resistencia del aire, Elevatorsy asume pérdidas de 19% a 20%, y Kawakami elaboró un ábaco de coeficientes de pérdida en función de las velocidades de despegue, existiendo mayores pérdidas a mayores velocidades.

CAPÍTULO III

3 ANÁLISIS DIMENSIONAL SOBRE EL FENÓMENO DEL CHORRO A LA SALIDA DEL ESQUÍ

El análisis dimensional ha presentado gran ayuda a los conocimientos de los fenómenos del flujo de los fluidos, ya que el comportamiento de los fenómenos hidráulicos es tan complejo que la mecánica de fluidos es incapaz de describirlos en su totalidad, puesto que la acción de cada elemento es tridimensional. Es por esto, que mediante la simulación física nos permite relacionar matemáticamente las dimensiones de las magnitudes físicas a ser simuladas.

En toda ecuación que exprese una relación entre magnitudes físicas debe verificarse la igualdad dimensional de la misma. En general, todas las relaciones físicas pueden reducirse a una relación entre las magnitudes fundamentales, fuerza [F], longitud [L] y tiempo [T] o bien la masa [M], longitud [L] y tiempo [T].

El uso de modelos físicos hidráulicos implica que estos deben ser semejantes al prototipo, para lo cual debe satisfacerse las leyes de similitud Geométrica, Cinemática y Dinámica, que en conjunto relacionan las magnitudes físicas homologas definidas en ambos sistemas, el prototipo A_p y el modelo A_m .

3.1 SIMILITUD GEOMÉTRICA

La similitud geométrica consiste en la definición de formas y dimensiones homologas entre prototipo y modelo, que implica una relación constante e_L llamada escala de longitud o de modelo:

$$e_L = \frac{L_p}{L_m} \quad (3.1)$$

Donde:

L_p = Longitud en prototipo.

L_m = Longitud en modelo.

e_L = Escala de longitudes.

3.2 SIMILITUD CINEMÁTICA

La similitud cinemáticas se cumple cuando los patrones y trayectorias del movimiento son geoméricamente similares y además las velocidades guardan una proporción constante a través de todo el campo del flujo tanto en modelo como en prototipo, esta relación se representa con la escala de velocidades e_v .

$$e_v = \frac{V_P}{V_m} \quad (3.2)$$

Donde:

V_P = Velocidad en prototipo.

V_m =Velocidad en modelo.

e_v =Escala de velocidades.

Generalizando la ecuación 3.2 tenemos:

$$e_v = \frac{e_L}{e_T} = \left(\frac{\frac{L_P}{L_m}}{\frac{T_P}{T_m}} \right) \quad (3.3)$$

Donde:

T_P = Tiempo en prototipo.

T_m =Tiempo en modelo.

e_T =Escala de tiempo.

3.3 SIMILITUD DINÁMICA RESTRINGIDA

El movimiento del fluido en el modelo y prototipo, para que sea similar en forma completa no es suficiente que cumpla con las similitudes geométrica y cinemática también es necesario que se cumpla con la similitud que considera las condiciones dinámicas del flujo, es decir, las fuerzas que actúan sobre puntos homólogos deben ser similares en los dos sistemas prototipo y modelo, pero como todas las fuerzas dinámicas y externas no son similares, se debe identificar a la fuerza más importante que condiciona el fenómeno hidráulico en el prototipo y representarla en el modelo utilizando uno solo de los parámetros adimensionales conocidos ya sea Froude, Reynolds, Euler, Weber, Mach.¹⁷ Es así que se trata de alcanzar una similitud dinámica restringida o particular al definir que

¹⁷ Hidalgo, M. "Introducción a la teoría de modelos hidráulicos y aplicaciones básicas". Quito. Escuela Politécnica Nacional –Departamento de hidráulica

parámetro es el adecuado para el fenómeno analizado, se puede establecer en principio los siguientes.

FUERZA PREDOMINANTE	IDENTIDAD	SIMILITUD PARTICULAR	TIPO DE MODELO
Gravedad	Fr	Froude	Froudiano
Viscosidad	Re	Reynolds	Viscoso
Tensión Superficial	We	Weber	-
Elasticidad	Ma	Mach	Elástico
Gravedad y Viscosidad	Fr y Ma	Froude y Reynolds	Grávico - viscoso

Tabla No 3.1 Parámetros adimensionales

El modelo físico de la Presa Toachi y sus obras complementarias al ser un modelo en el cual la simulación de flujo trata sobre un flujo en superficie libre adopta el criterio de similitud de Froude.

3.3.1 SIMILITUD DINÁMICA RESTRINGIDA DE FROUDE

Las leyes de Froude representan la condición de similitud dinámica para flujo en modelos y prototipos exclusivamente gobernados por gravedad. Otras fuerzas como las de fricción, las de viscosidad, capilaridad, no afectan al flujo o su efecto puede ser despreciado.

La idea de superficie libre es cuando se tiene presión constante que generalmente es la atmosférica. La influencia de la tensión superficial es despreciable en flujos con superficie libre y ningún efecto de compresibilidad si la superficie es amplia. Bajo la acción de la gravedad, que es uno de los agente principales, es que obtiene importancia el número de Froude, este parámetro adimensional, constituye un índice de comportamiento entre fuerzas inerciales con respecto a las gravitacionales. En muchos casos las fuerzas cortantes son tan pequeñas con relación a las fuerzas de gravedad que se hacen despreciables en flujos con superficie libre, por lo que se logra una similitud dinámica aceptable, sin ser necesario cumplir con la igualdad del número de Reynolds, ya que en la práctica es casi imposible lograr ambas similitudes simultáneamente.

En los casos llamados similitud de Froude se tiene:

$$Fr_{\text{prototipo}} = Fr_{\text{modelo}} \quad (3.4)$$

Siendo
$$Fr = V / \sqrt{g * L} \quad (3.5)$$

Por lo tanto
$$Vp / \sqrt{g * Lp} = Vm / \sqrt{g * Lm} \quad (3.6)$$

Como la aceleración de la gravedad es esencialmente la misma en el modelo que en prototipo entonces siguiendo el criterio de similitud de Froude se puede establecer las siguientes relaciones.

$$V_p/V_m = \sqrt{L_p/L_m} \quad (3.7)$$

$$e_v = e_L^{\frac{1}{2}} \quad (3.8)$$

Con esta relación resultan las siguientes escalas de magnitudes según el criterio de Froude.

Magnitud	Símbolo	Equivalencia
Longitud	e_L	e_L
Superficie	e_A	e_L^2
Velocidad	e_v	$e_L^{1/2}$
Tiempo	e_T	$e_L^{1/2}$
Caudal	e_Q	$e_L^{5/2}$
Fuerza	e_F	e_L^3
Presión	e_p	e_L

Tabla No 3.2 Escala de magnitudes según criterio de Froude

Para garantizar que las fuerzas de viscosidad y de tensión superficial no sean relevantes en los fenómenos analizados de flujo, como normalmente ocurre en el prototipo, es necesario asegurar que en el modelo se alcance un flujo turbulento totalmente desarrollado, manteniendo el mismo valor del factor de fricción tanto en modelo como en prototipo. De esta forma se garantiza que la pendiente de la línea de energía sea igual en ambos, lo que se alcanza construyendo el modelo hidráulicamente más liso que el prototipo.¹⁸ Para evitar los efectos antes mencionados debe cumplirse lo siguiente:

$$Re^{0,2} \times We^{0,6} > 900 \quad (3.9)$$

Si se define el número de Weber como:

$$We \equiv \sqrt{gh}/\sqrt{\sigma/\rho R_h} \quad (3.10)$$

¹⁸ Velasco, C. Vera, P. “Estudio en modelo físico de la disipación de energía aguas debajo de los vertederos de excesos y desagües de fondo de la presa Toachi en el proyecto Toachi Pilatón”. Tesis de grado. Quito 2012. Facultad de Ingeniería Civil-EPN

Y el de número de Reynolds como:

$$Re = \rho V R_h / \nu \quad (3.11)$$

Donde:

Re: parámetro adimensional de Reynolds

We: parámetro adimensional de Weber

g: gravedad [m/s^2]

R_h : radio hidráulico [m]

ν : viscosidad cinemática [$1,31 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$]

ρ : densidad del agua [1000 kg/m^3]

Un número de Reynolds en modelo mayor a 2×10^4 garantiza un grado de turbulencia totalmente desarrollado lo que significa que la resistencia al movimiento del agua, los puntos y zonas de separación del flujo principal son debidamente representados en el modelo a escala.

Las cargas sobre los vertederos deberían ser mayores a 2cm, mediante este requerimiento se elimina la influencia de la tensión superficial ya que la influencia de la tensión superficial en relación con las fuerzas de inercia crece mientras menor es la profundidad del agua¹⁹.

De igual manera, el valor del coeficiente de pérdida de energía por fricción en modelo debe mantenerse similar al obtenido en prototipo, es decir, se debe garantizar igual pendiente de la línea de energía en los tramos de flujo a superficie libre tanto en el modelo como en el prototipo.

La viscosidad y la rugosidad del contorno tienen importancia en modelos con nivel libre de agua y con el mismo fluido en modelo y prototipo, por lo que para mantener la ley de similitud de Froude, el número de Reynolds en el modelo debe ser más pequeño que en el prototipo, y esto se logra cuando la rugosidad del modelo se selecciona de tal forma que el coeficiente de pérdida por fricción λ permanece igual en el modelo y el prototipo, en consecuencia el modelo deberá construirse hidráulicamente más liso.

$$\lambda = \frac{h_v}{L} \frac{8gR_h}{V^2} = \left(\frac{h_v}{L} \right) \frac{8}{Fr^2} \quad (3.12)$$

¹⁹ Castro, M. “Análisis dimensional y modelación física en hidráulica”. Quito. Escuela Politécnica Nacional- Departamento de Hidráulica.

El diagrama que relaciona el coeficiente de pérdidas por fricción con el número de Reynolds y la rugosidad relativa es el Diagrama de Moody, el cual es válido para modelo y prototipo.

3.4 SIMILITUD DINÁMICA EXACTA

Se denomina similitud dinámica exacta o perfecta cuando todas las fuerzas dinámicas y externas en el prototipo son o serán iguales al modelo, esto significa que se tendrán que cumplir las ecuaciones de los números de Froude, Reynolds, Weber y Cauchy lo cual es prácticamente imposible.

Para obtener una similitud dinámica exacta o perfecta se debe tomar en cuenta los efectos de escala en la similitud dinámica restringida.

3.4.1 EFECTOS DE ESCALA

El efecto de escala es un término que es aplicado a discrepancias observadas entre el comportamiento hidrodinámico de un modelo y el prototipo, causadas por el hecho de que no todas las fuerzas que intervienen en el prototipo pueden ser representadas exactamente en la escala reducida de modelo.

En modelos hidráulicos utilizados en el estudio de la disipación de energía por medio de un salto en esquí no se puede reproducir fenómenos como aireación de los chorros de descarga, influencia del viento, es por ello que en el prototipo se tendrá alcances de los chorros más pequeños que los alcanzados en modelo, ya que en prototipo la masa de agua del chorro va a presentar mayor rozamiento con la masa de aire.

La introducción de aire en la trayectoria del chorro es otro de los fenómenos no considerados en el modelo, por lo que la situación más crítica es el prototipo, de igual forma el fenómeno de atomización es otro efecto no considerado en el modelo, pero que es bien importante considerarlo en el prototipo.

3.5 JUSTIFICACIÓN DE LA SELECCIÓN DE LA ESCALA DEL MODELO EXISTENTE

La selección de la escala geométrica del modelo de la presa Toachi y sus obras complementarias fue seleccionada de tal forma que el modelo cumpla con los requerimientos impuestos por la similitud restringida de Froude y su vez que la escala

escala brinde facilidad de operación, medición, observación y que no sea excesivamente costoso.

Los aspectos que se debe tomar en cuenta para seleccionar una escala adecuada son los siguientes:

1. El espacio físico o área disponible donde se va a construir el modelo.
2. La capacidad del sistema de alimentación de caudal del modelo.
3. La similitud que gobierna en el fenómeno.
4. El efecto de la tensión superficial, donde las profundidades de agua en el modelo deben ser siempre más grandes que 3 cm.
5. Instrumentación disponible para realizar mediciones como calados, presión, velocidad, etc.
6. Los materiales con los cuales se va a elaborar el modelo, ya que el modelo debe ser hidráulicamente más liso que el prototipo.
7. El factor económico

En esta investigación experimental la escala adoptada para la elaboración de las alternativas de los deflectores a la salida del vertedero de excesos derecho es la misma escala con la que está construida la presa Toachi que es la escala 1:50, la misma que fue seleccionada luego de un análisis comparativo entre otras escalas, esta escala brinda la disponibilidad en cuanto a espacio físico para su implantación dentro del Centro de Investigaciones y Estudios en Recursos Hídricos CIERHI, así como la capacidad de abastecimiento de los caudales.

En la tabla No.3.3 se presenta la comparación de las tres escalas que se propusieron para la construcción.²⁰

²⁰ ESTUDIO EN MODELO HIDRÁULICO DE LA PRESA TOACHI Y SUS OBRAS COMPLEMENTARIAS. Informe técnico fase I, EPN. Quito, Noviembre 2011

DIMENSIONES	PROTOTIPO	MODELO		
		1:40	1:50	1:60
CAUDAL	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[m ³ /s]
Desagües	3200	0,316	0,181	0,115
Vertederos	1182	0,117	0,067	0,042
Sarapullo	40	0,004	0,002	0,001
LONGITUD	[m]	[m]	[m]	[m]
Altura	59	1,48	1,18	0,98
Ancho	170,5	4,26	3,41	2,84
CALADO	[m]	[m]	[m]	[m]
Desagües	43	1,075	0,860	0,717
Vertederos	7,5	0,188	0,150	0,125
MATERIAL	[m]	[m]	[m]	[m]
Roca cuenco	1	0,025	0,020	0,017

Tabla No 3.3 Selección de la escala del modelo

3.6 CONCLUSIONES

1. El criterio de similitud adoptado para el modelo físico de la presa Toachi y sus obras complementarias es el de Froude, debido a que es un flujo a superficie libre donde las fuerzas predominantes son las gravitatorias, despreciando así el efecto de las demás fuerzas.
2. Las fuerzas de viscosidad y de tensión superficial son despreciables en el modelo ya que se asegura que el flujo sea turbulento totalmente desarrollado, el modelo se construyó con acrílico cuyo coeficiente de rugosidad de manning es 0.009 garantizando que el coeficiente de fricción del modelo sea muy cercano al prototipo y a su vez que el número de Reynolds en modelo sea menor que en prototipo asegurando la similitud de Froude.
3. Al adoptar el criterio de Froude para el diseño, operación e investigación debe cumplir con la condición de que Froude de prototipo debe ser igual a Froude de modelo.

4. La escala 1:50 adoptada para la construcción del modelo es la más apta puesto que cumple con los requerimientos tanto de espacio físico, abastecimiento de caudal, economía, reproducción fiel de los fenómenos garantizando que los calados de agua en las estructuras sean mayores a 3cm.

CAPÍTULO IV

4 DESCRIPCIÓN DEL MODELO FÍSICO Y DE LA CONSTRUCCIÓN DE LAS VARIANTES

4.1 DISEÑO DEL MODELO HIDRÁULICO FÍSICO EXISTENTE

El modelo físico de la presa Toachi y sus obras complementarias está conformado por tres zonas claramente diferenciadas que son la zona de ingreso, el modelo propiamente dicho y la zona de salida y restitución al río.

En la figura 4.1 Se indica a detalle la conformación del modelo físico con todas sus estructuras que lo conforman.

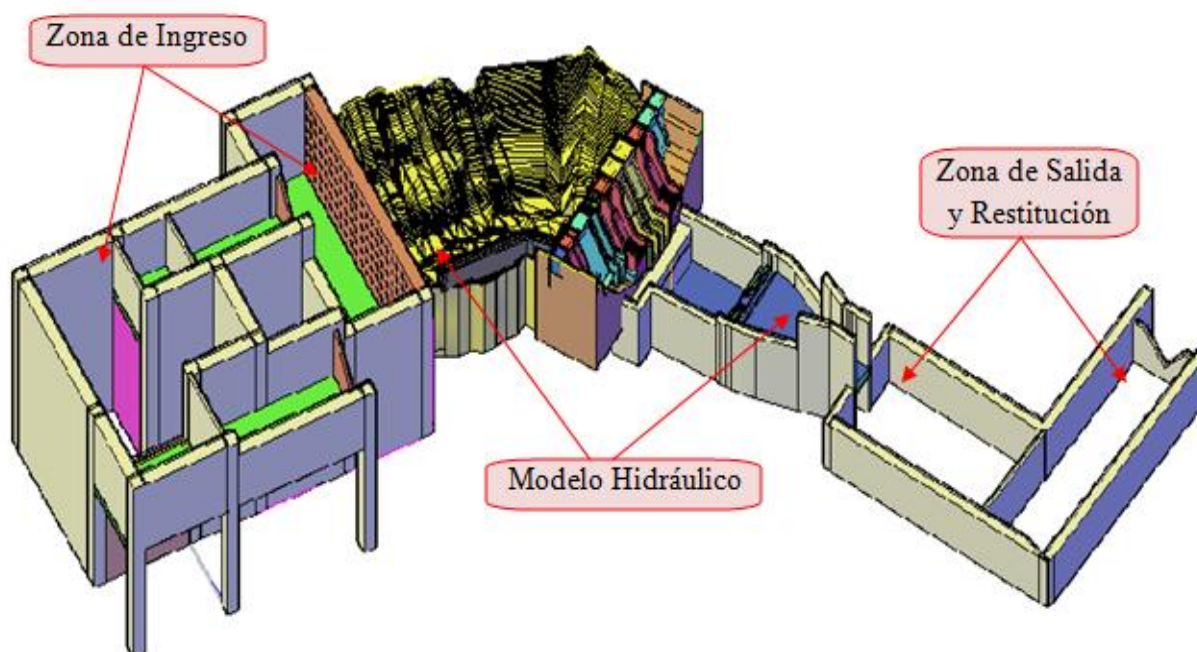


Figura No 4.1 Esquema general de la Presa Toachi y sus obras complementarias

4.1.1 ZONA DE INGRESO

La zona de ingreso es la que permite el abastecimiento de caudales determinados para la operación del modelo físico y a su vez ayudar a disipar la energía residual y ha uniformizar el flujo previo al ingreso del modelo propiamente dicho. Está conformada por:

- Sistema de tuberías
- Tanque de abastecimiento

- Canal de ingreso

4.1.1.1 SISTEMA DE TUBERÍAS

El sistema de ingreso está conformado por un sistema de tres tuberías las mismas que dotan el caudal necesario al modelo físico mediante el cierre o apertura de las válvulas de compuerta. Los datos principales de cada tubería se presentan en la tabla No 4.1, mientras que en la figura No 4.2 se presenta la ubicación de las tuberías de ingreso desde las tomas en el sistema central de recirculación del CIERHI (Centro de investigaciones y estudios de recursos hídricos) hasta los tanques de entrada del modelo.

DESCRIPCIÓN	UNIDAD	VALOR
Tubería No. 1		
Longitud	m	34.50
Diámetro	mm	200
Material	---	PVC de presión
Número de codos 90° instalados	---	6
Tubería No. 2		
Longitud	m	39.60
Diámetro	mm	200
Material	---	PVC de presión
Número de codos 90° instalados	---	6
Tubería No. 3		
Longitud	m	24.60
Diámetro	mm	200
Material	---	PVC de presión
Número de codos 90° instalados	---	6

Tabla No 4.1 Datos principales de las tuberías de ingreso al tanque

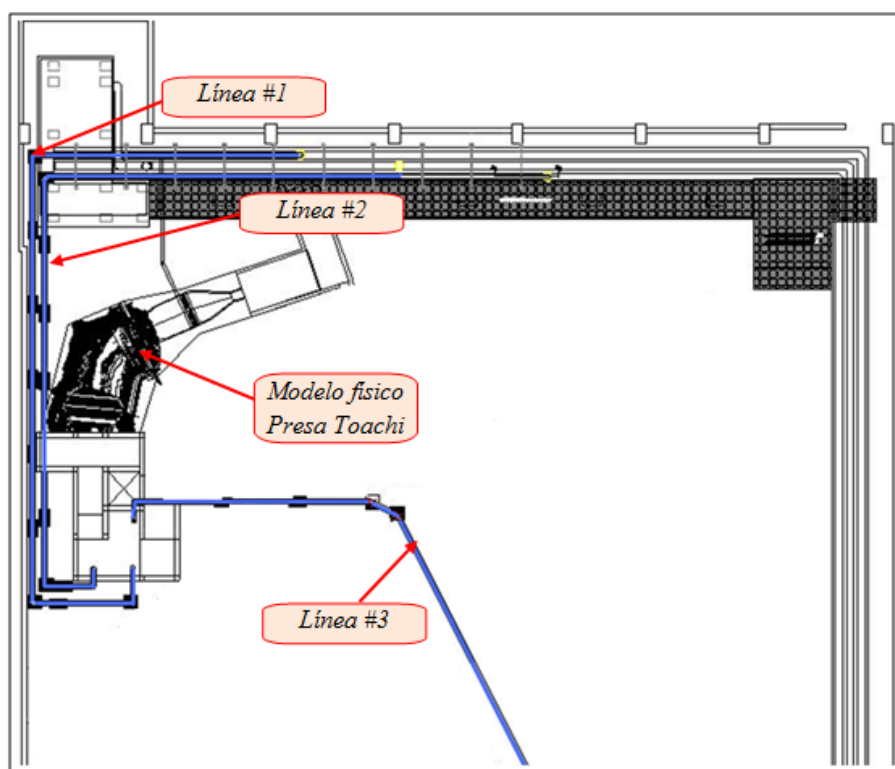


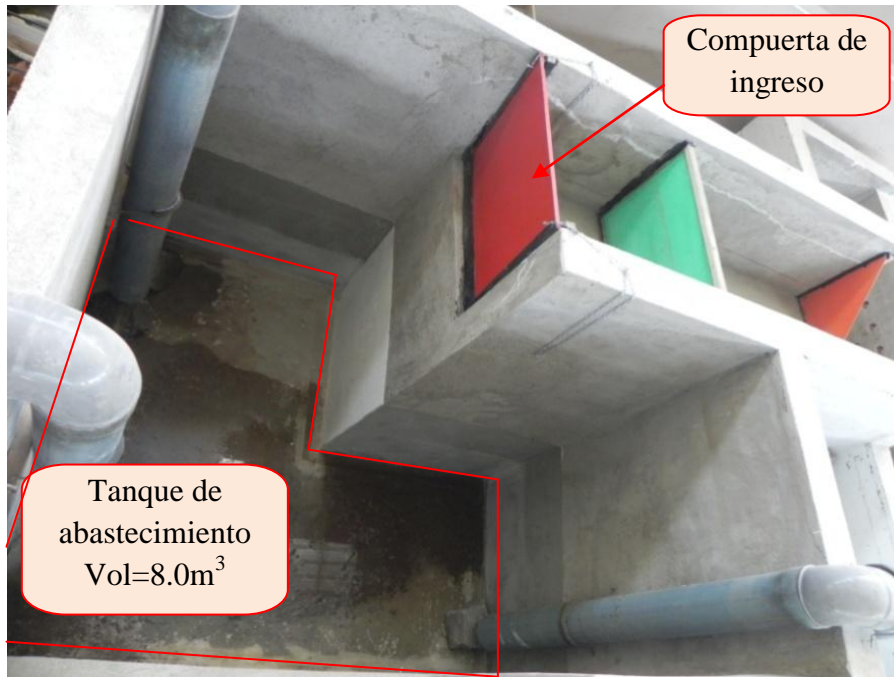
Figura No 4.2 Implantación de las líneas de abastecimiento en el CIERHI

4.1.1.2 TANQUE DE ABASTECIMIENTO

El tanque de abastecimiento del modelo físico de la presa Toachi tiene por objetivo almacenar el volumen de agua suficiente para suministrar el caudal necesario de acuerdo al plan de pruebas del modelo. Sus características geométricas se detallan a continuación en la tabla No 4.2 y en la fotografía No 4.1 la conformación del tanque.

DESCRIPCIÓN	DIMENSIÓN	UNIDAD
Altura	2.6	m
Ancho mínimo	1.5	m
Ancho máximo	2.7	m
Longitud mínima	1.3	m
Longitud máxima	2.5	m
Volumen de almacenamiento	8.0	m ³
Diámetro de la tubería de desagüe PVC	2	Pulg.

Tabla No 4.2 Características geométricas del tanque de abastecimiento



Fotografía No 4.1 Tanque de abastecimiento

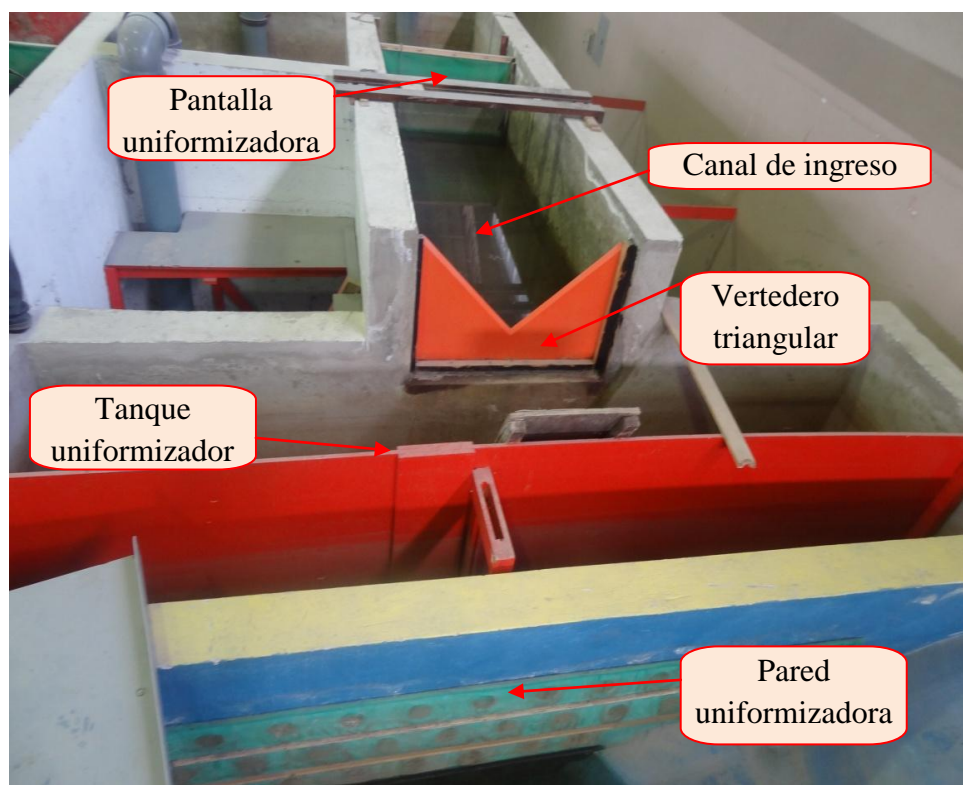
4.1.1.3 CANAL DE INGRESO

El ingreso a la zona del modelo se lo realiza a través de un canal rectangular de 1.0 m de ancho, 3.0 m de longitud, 0.75 m de altura, este se encuentra ubicado después de la compuerta de ingreso con el fin de conducir el caudal del tanque de abastecimiento al tanque uniformizador por medio de un vertedero triangular, desde el cual finalmente el flujo ingresa hacia el tramo de embalse representado en el modelo de la Presa Toachi

Los elementos complementarios del canal son:

- La pantalla uniformizadora que sirve para garantizar la uniformización del flujo en la zona de aproximación hacia el vertedero de medición de caudales.
- El vertedero de aforo triangular con ángulo central de 90° que permite la medición de los caudales que ingresan al modelo.
- Tanque y pared uniformizadora, elementos que sirven para uniformizar el caudal previo a su ingreso al modelo propiamente dicho.

En la fotografía No 4.2, se presentan los componentes de ingreso al modelo físico.



Fotografía No 4.2 Componentes de ingreso al modelo físico.

4.1.2 MODELO FÍSICO PRESA TOACHI Y OBRAS COMPLEMENTARIAS

Corresponde a la representación a escala 1:50 del tramo seleccionado para la investigación experimental. El área aproximada de construcción es de 37 m² (sin contar con el tanque, canales de entrada y pasarelas de acceso). La representación del tramo de aproximación hacia la presa que corresponde al tramo de embalse es aproximadamente de 4.5 m lo que en prototipo equivale a 225 m. Esta longitud permite representar en el modelo la curvatura que presenta el cauce y márgenes del río Toachi en la aproximación hacia el eje de la presa seleccionado. Aguas abajo, el modelo representa aproximadamente 195 m desde el pie de presa en donde se incluye el cuenco de disipación de energía, la transición de entrega al cauce natural y un pequeño tramo del río con una longitud de 25 m en prototipo.

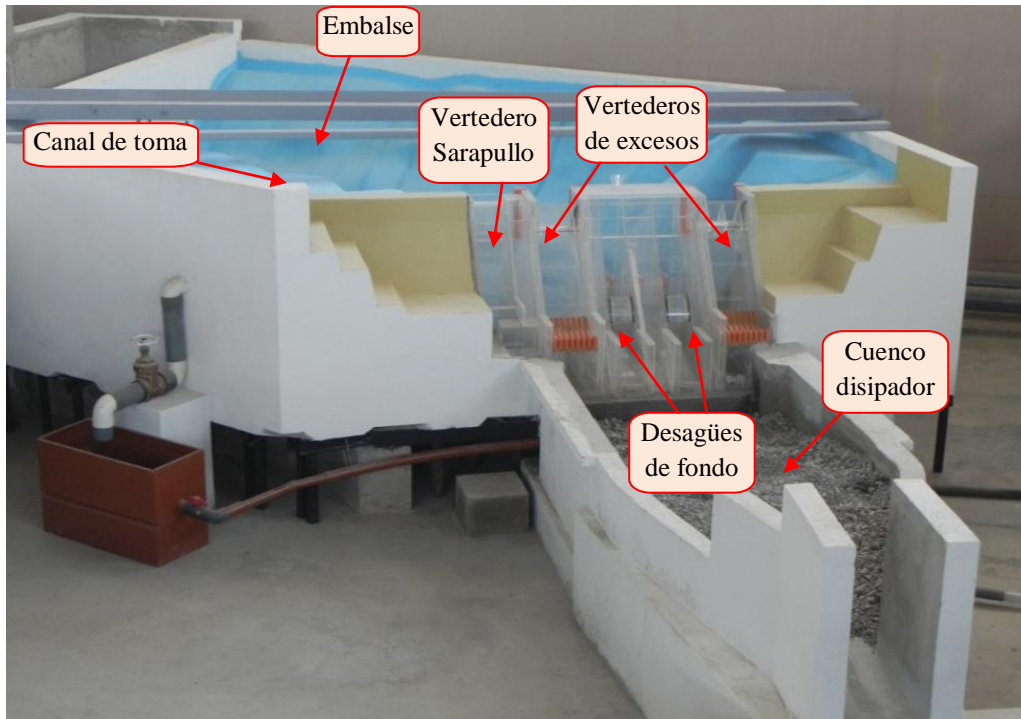
En el modelo físico todo el tramo de aguas debajo de la presa se desarrolla en una longitud de 3.90 m.²¹

La presa incluye las siguientes obras complementarias:

- Vertederos de excesos
- Desagües de fondo
- Vertedero Sarapullo

²¹ ESTUDIO EN MODELO HIDRÁULICO DE LA PRESA TOACHI Y SUS OBRAS COMPLEMENTARIAS. Informe técnico fase I, EPN. Quito, Noviembre 2011.

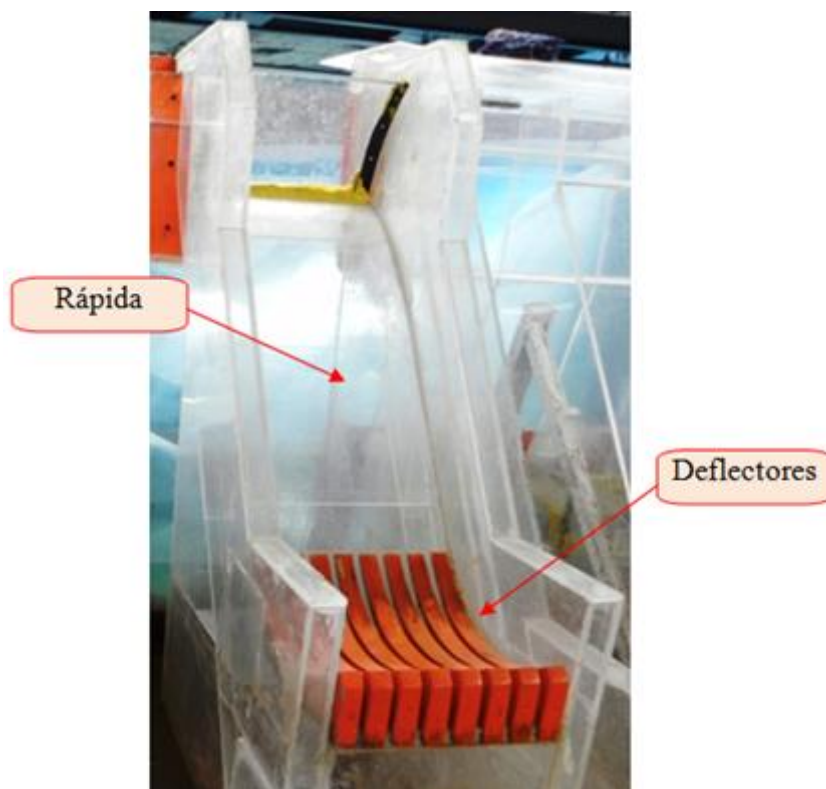
- Cuenco de disipación de energía y transición
- Embalse y ataguía
- Canal de toma y obra de toma



Fotografía No 4.3 Modelo físico de la presa Toachi y sus obras complementarias

4.1.2.1 VERTEDEROS DE EXCESOS

Los vertederos en el modelo son de acrílico transparente de 6mm de espesor, sus pilas fueron elaboradas en madera las mismas que fueron lacadas y masilladas de tal forma de obtener un acabado liso, de igual forma los deflectores sobre el esquí son construidos en MDF (Medium Density Fiberboard), se los instaló mediante pernos a la base del esquí y a su vez fueron impermeabilizados con silicón. La sección de empate de los deflectores con la rápida de cada vertedero fue moldeada con plastilina para reducir las perturbaciones en el flujo. En la tabla No 4.3 se describe los datos más relevantes de los vertederos de excesos.



Fotografía No 4.4 Estructura de los vertederos de excesos instalado

4.1.2.1.1 Deflectores del diseño original

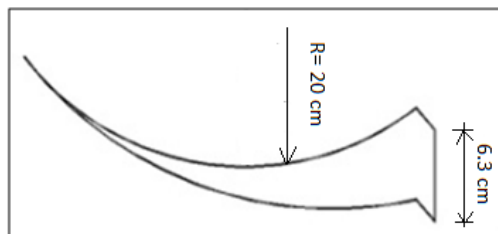
Los deflectores al pie de los vertederos de excesos fueron construidos en MDF, masillados, pintados y lacados para garantizar su impermeabilización y obtener una superficie lisa. En la tabla No 4.4 se describen los datos más importantes.

DESCRIPCIÓN	UNIDADES	PROTOTIPO	MODELO
DEFLECTORES			
Ángulo de salida	°	37	37
Radio de curvatura	m	10	0.20
Ancho	m	1.25	0.025
Altura	m	3.15	0.063
Número de deflectores	-	8	8

Tabla No 4.4 Datos de los deflectores en modelo y prototipo

Los 8 deflectores se encuentran distribuidos simétricamente en el ancho total del esquí de 28 cm, la separación entre ellos es de 1.0 cm. Los deflectores rompen la parte inferior del flujo compacto de aproximación obteniéndose dos láminas una superior formada por los

chorros lanzados de los deflectores y una inferior formada por los chorros que son lanzados desde el cucharón del esquí.



Fotografía No 4.5 Estructura de los deflectores y corte transversal del mismo

4.1.2.2 DESAGÜES DE FONDO

Los dos desagües de fondo fueron construidos en acrílico transparente de 6 mm de espesor. Las pilas en la sección de entrada a los desagües de fondo fueron elaboradas en madera lacada y masilladas de tal forma de obtener una superficie lisa, también se colocaron piezómetros en el perfil para registrar las presiones debidas al flujo. En la tabla No 4.5 se presentan las dimensiones tanto en prototipo como en modelo, más relevantes de esta estructura.

DESCRIPCIÓN	UNIDADES	PROTOTIPO	MODELO
DESAGÜES DE FONDO			
Caudal de diseño	m ³ /s	1600	0.091
Sección de entrada	mxm	8x8	0.16x0.16
Radio compuerta	m	11.5	0.23
Ángulo de salida	°	29	29

Tabla No 4.5 Datos de los desagües de fondo en modelo y prototipo

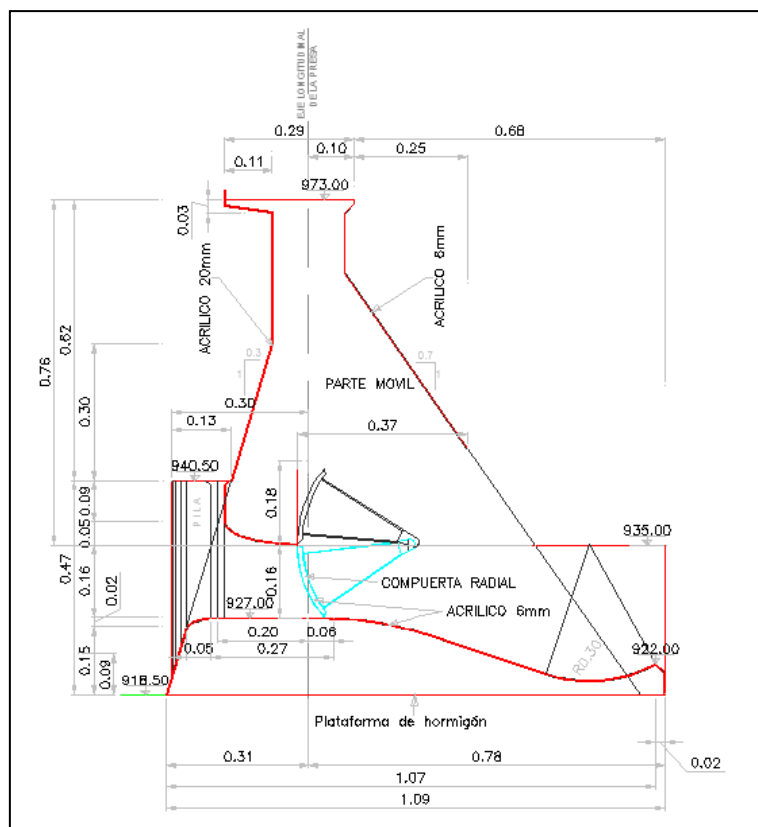


Figura No 4.4 Esquema del corte transversal del desagüe de fondo



Fotografía No 4.6 Estructura de los desagües de fondo instalados

4.1.2.3 VERTEDERO SARAPULLO MODIFICADO

El vertedero Sarapullo se modificó en su totalidad presentaba un perfil tipo creager con salto en esquí, ahora presenta una rápida escalonada con un número total de 48 gradas y al final una curvatura hasta descargar en el cuenco dissipador, fue construido en acrílico transparente de 6mm de espesor e impermeabilizado con silicón, se colocaron además inyectores de permanganato para la mejor observación del tipo de flujo predominante , en la tabla No 4.6 se indica los datos más relevantes del vertedero.

DESCRIPCIÓN	UNIDADES	PROTOTIPO	MODELO
VERTEDERO SARAPULLO			
Ancho del vertedero	m	6.5	0.13
Número de gradas en la rápida	-	48.0	48.0
Huella	m	0.52	0.0104
Contrahuella	m	0.75	0.015

Tabla No 4.6 Datos del Vertedero Sarapullo en modelo y prototipo

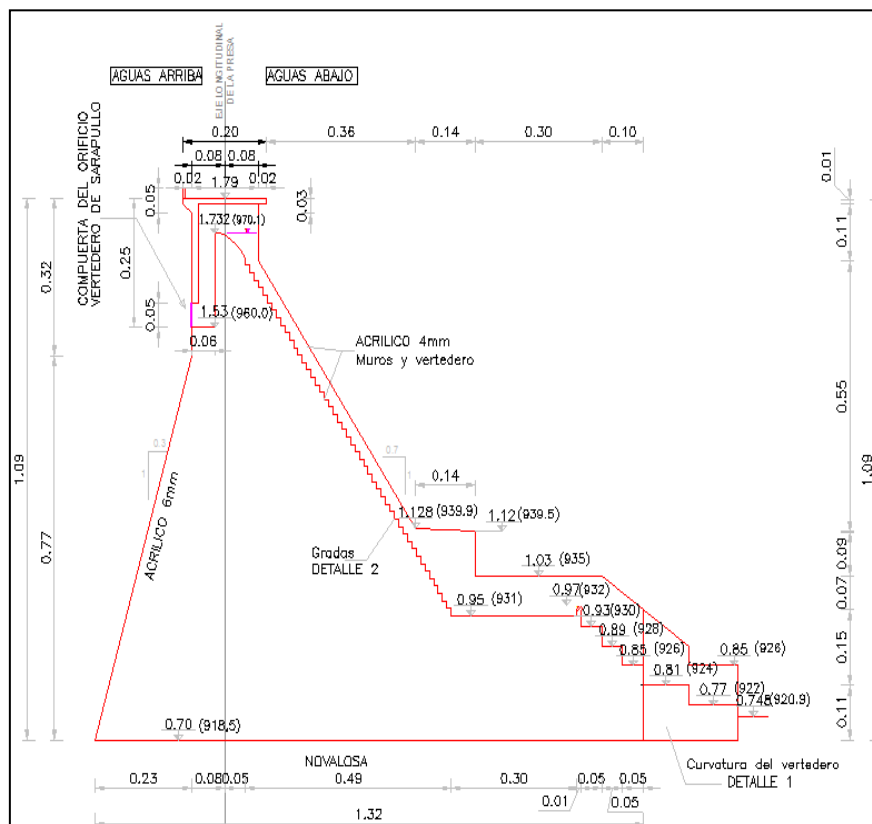


Figura No 4.5 Esquema del corte transversal del vertedero Sarapullo



Fotografía No 4.7 Estructura del vertedero Sarapullo instalado

4.1.2.4 CUENCO DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA Y TRANSICIÓN

El cuenco de disipación y la transición al río han sido construidas con paredes de mampostería enlucidas, pintadas e impermeabilizadas y su fondo es una losa de hormigón con juntas de impermeabilización para impedir fugas. Las dimensiones del cuenco amortiguador se modificaron de acuerdo a las recomendaciones del informe de la primera fase de la investigación²², cuyas dimensiones se indican en la tabla No 4.7

DESCRIPCIÓN	UNIDADES	PROTOTIPO	MODELO
CUENCO DE DISIPACIÓN			
Ancho	m	83.5	1.67
Largo	m	105.0	2.10
Altura	m	20.00	0.40
Cota del nivel del material	msnm	918.50	0.70
Cota de la cresta del umbral	msnm	922.00	0.77
Diámetro material aluvial	m	1.0	0.02

Tabla No 4.7 Datos del Cuenco disipador recomendado en modelo y prototipo

²² ESTUDIO EN MODELO HIDRÁULICO DE LA PRESA TOACHI Y SUS OBRAS COMPLEMENTARIAS. Informe técnico fase I, EPN. Quito, Noviembre 2011.

De igual forma la transición al río desde el cuenco amortiguador es de hormigón enlucido, en la entrada de la transición se tiene una escollera (umbral), la transición tiene una pendiente del 2%, en el cuadro No 4.8 se indica las dimensiones de la transición.

DESCRIPCIÓN	UNIDADES	PROTOTIPO	MODELO
TRANSICIÓN AL RÍO			
Longitud	m	85.0	1.70
Ancho de entrada	m	83.5	1.67
Ancho de salida	m	17.25	0.34
Pendiente	%	2.00	2.00
Longitud del río	m	25.00	0.50

Tabla No 4.8 Datos de la Transición en modelo y prototipo

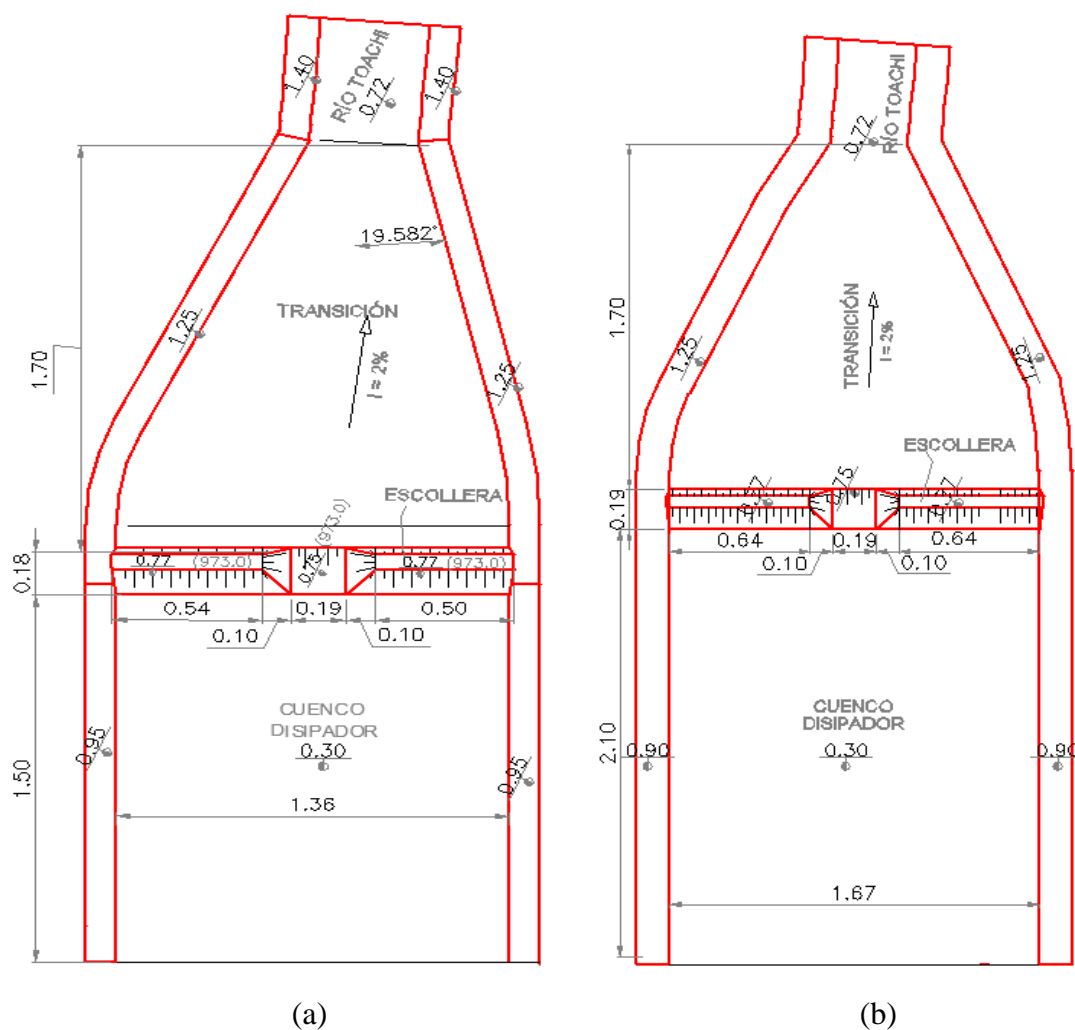
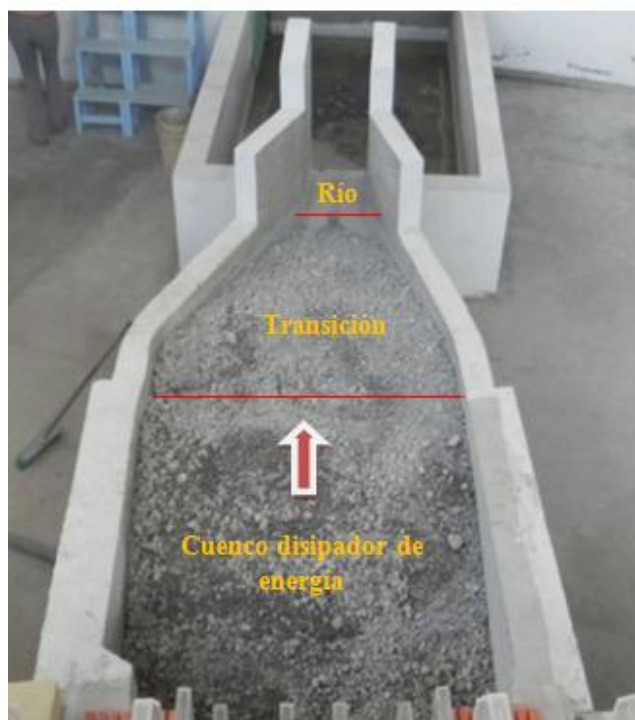


Figura No 4.6 (a) Cuenco disipador original (b) Cuenco disipador recomendado



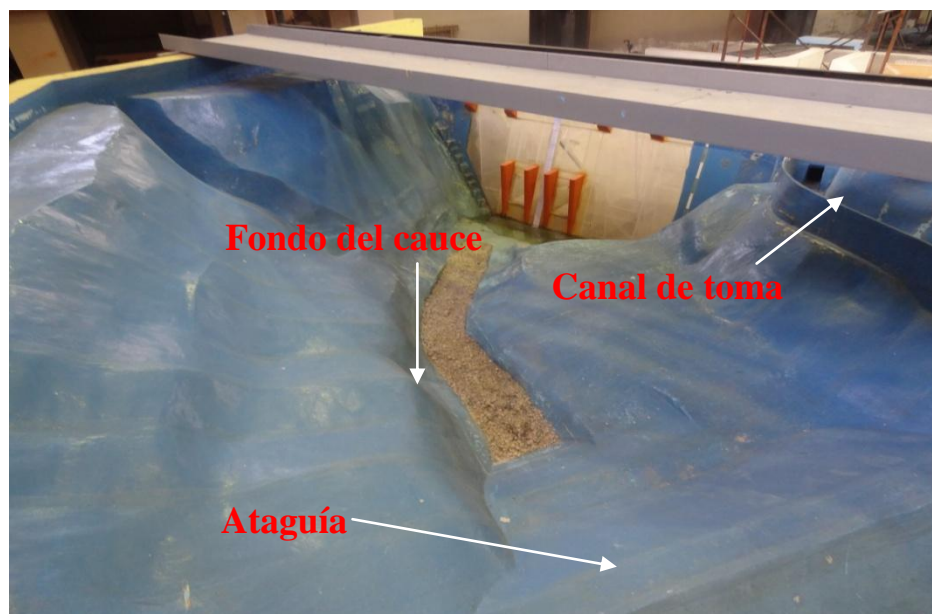
Fotografía No 4.8 Estructura del cuenco dissipador y transición al río

4.1.2.5 EMBALSE Y ATAGUÍA

Estas obras han sido conformadas siguiendo la topografía del tramo. Se utilizaron secciones transversales con distancias de 12.50 m en prototipo y 0.25 m en modelo. Los taludes laterales y cauce del río fueron conformados dentro de un tanque con losa de hormigón y paredes de mampostería. La topografía fue reproducida de acuerdo a los detalles entregados con material suelto compactado y terrocemento impermeabilizado y pintado. En la tabla No 4.9 se resumen los datos importantes del embalse y de la ataguía.

DESCRIPCIÓN	UNIDADES	PROTOTIPO	MODELO
EMBALSE			
Volumen	m ³	1.13x10 ⁶	9.00
Pendiente del fondo	%	2.50	2.50
ATAGUÍA			
Volumen	m ³	5.75x10 ⁴	0.46
Longitud de la cresta	m	85.50	1.71
Ancho de la cresta	m	6.00	0.12
Cota de la cresta	msnm	945.00	1.23 m

Tabla No 4.9 Datos del embalse y de la ataguía en modelo y prototipo



Fotografía No 4.9 Estructura del embalse y de la ataguía

4.1.2.6 CANAL DE TOMA

El canal de toma fue construido con mortero de cemento en la margen derecha del embalse de acuerdo al diseño original previsto. La salida de la bocatoma descarga a través de una tubería de PVC, de 110mm y está regulada por una válvula de compuerta. En la tabla No 4.10 se resume el dimensionamiento de estas estructuras en prototipo y en modelo.

DESCRIPCIÓN	UNIDADES	PROTOTIPO	MODELO
CANAL DE TOMA			
Longitud	m	96.50	1.93
Ancho	m	10.00	0.20
Cota de la cresta	msnm	964.00	1.61m
Pendiente	%	4.50	4.50
BOCATOMA			
Ancho máx.	m	5.75	0.11
Ancho mín.	m	3.50	0.07
Altura máx.	m	7.50	0.15
Altura mín.	m	5.60	0.11

Tabla No 4.10 Datos del canal de toma y bocatoma en modelo y prototipo



Fotografía No 4.10 Estructura del canal de toma y bocatoma

4.1.3 ZONA DE SALIDA Y RESTITUCIÓN AL RÍO

Está conformado por tanques y canales por medio de los cuales se recoge los caudales de operación desde el modelo de la presa Toachi y se los restituye al canal de recirculación del CIERHI.

En la tabla No 4.11 se resume las dimensiones más importantes de estos elementos.

DESCRIPCIÓN	UNIDAD	VALOR
TANQUE DE SALIDA		
Tipo	---	Rectangular
Ancho	m	1.70
Largo	m	4.20
Altura	m	0.70
CANAL DE DESCARGA		
Tipo	---	Rectangular
Ancho	m	1.20
Largo	m	2.60
Alto	m	0.70

Tabla No 4.11 Datos del tanque y canal de salida en modelo

El propósito principal del tanque es retener el material granular que arrastran los chorros de descarga tanto de los vertederos de excesos como de los desagües de fondo. En el tanque se ha colocado diagonalmente una pantalla de triplex con perforaciones con el fin de mejorar la distribución del flujo al canal, al final del canal tenemos un vertedero de aforo triangular para saber cuál es el caudal de entrega.



Fotografía No 4.11 Estructura del tanque de salida y canal de descarga

4.2 CHEQUEO DE LAS DIMENSIONES DE LA MODELACIÓN DE LAS ALTERNATIVAS.

Tomando como base para esta etapa de investigación, el modelo físico ya construido de la Presa Toachi a escala 1:50, se plantearon varias alternativas de deflectores a la salida del vertedero de excesos derecho. Todas las alternativas analizadas buscan cambiar la dirección del chorro impulsado desde el esquí y deflectores, de tal manera de que la fosa de socavación se conforme alejada de los contornos laterales del cuenco al pie de la presa Toachi. Las diferentes alternativas se construyeron en la carpintería del Centro de Investigaciones y Estudios del Recurso Hídrico (CIERHI) de la Escuela Politécnica Nacional, las alternativas planteadas son las siguientes:

- Alternativa A; paredes convergentes sobre el esquí.
- Alternativa A1; pared convergente en la derecha del esquí.
- Alternativa B; Deflectores de alturas variables sobre el esquí.
- Alternativa C; Deflector peraltado

- Alternativa D; Deflectores trapezoidales con pared convergente.

4.2.1 ALTERNATIVA A : PAREDES CONVERGENTES SOBRE EL ESQUÍ

Esta alternativa plantea un estrechamiento simétrico en el esquí de los vertederos de excesos mediante la colocación de paredes laterales convergentes que forman un ángulo de contracción de 13.79° con respecto a los muros de los vertederos de excesos. El ancho de cada contracción es de 0.07 m, reduciendo la salida del esquí a un ancho total de 0.14m, manteniéndose el radio de curvatura original del esquí. En la tabla No 4.12 se resumen las características geométricas de esta modificación.

DESCRIPCIÓN	UNIDADES	PROTOTIPO	MODELO
VERTEDEROS DE EXCESOS DERECHO			
SALTO EN ESQUÍ DE RÁPIDA			
Ángulo de salida	°	12	12
Radio de curvatura	m	14	0.28
PAREDES LATERALES (CONTRACCIÓN)			
Ángulo de convergencia	°	13.79	13.79
Altura de la pared	m	14.5	0.29
Longitud de pared	m	14.5	0.29

Tabla No 4.12 Datos generales de la alternativa A

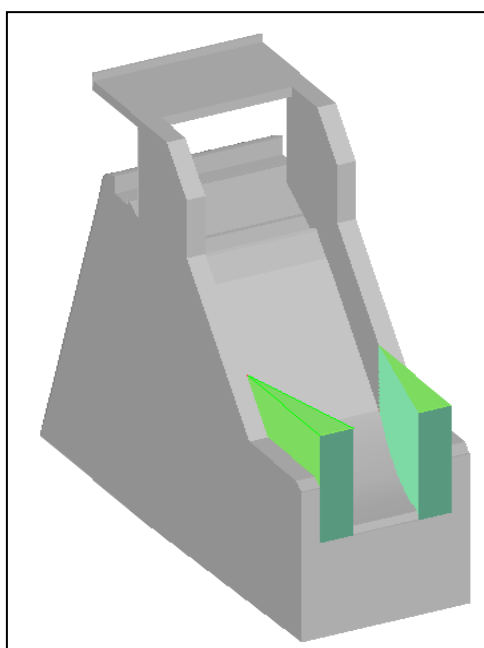
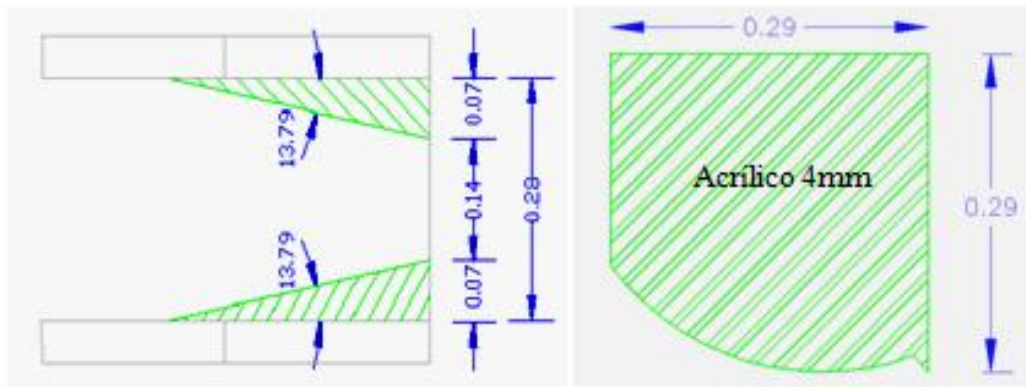


Figura No 4.7 Vista general en 3D de la alternativa A



(a)

(b)

Figura No 4.8 (a) Dimensiones en planta alternativa A (b) Dimensiones de las paredes de contracción

Antes de la construcción de esta alternativa se procedió a la desinstalación de los deflectores del diseño original de tal forma de obtener el vertedero con el esquí liso, la construcción de esta modificación se hizo en acrílico transparente de 4mm de ancho, su instalación se la realizó con silicón para garantizar la impermeabilización en las uniones, de igual forma para disminuir la posible perturbación del flujo entre la unión de las paredes de contracción y los muros del vertedero se utilizó plastilina.



(a)



(b)

Fotografía No 4.12 (a) Construcción de las paredes laterales en acrílico (b) Instalación de las paredes laterales



Fotografía No 4.13 Vista de la alternativa A construida en el modelo

4.2.2 ALTERNATIVA A-1 : PARED CONVERGENTE A LA DERECHA DE EL ESQUÍ

La alternativa A-1 corresponde a un estrechamiento asimétrico instalando la pared de contracción solo en contorno derecho. Se mantiene el mismo ángulo de contracción de 13.79° que la alternativa A, el contorno lateral izquierdo no sufre modificación con respecto a la orientación original, de igual forma el ángulo de salida y el radio de curvatura del salto en esquí son los mismos. Esta modificación busca cambiar únicamente la dirección del chorro que afecta el talud derecho del cuenco de disipación. En la tabla No 4.13 se resumen las características geométricas de esta modificación.

DESCRIPCIÓN	UNIDADES	PROTOTIPO	MODELO
VERTEDEROS DE EXCESOS DERECHO			
SALTO EN ESQUÍ DE RÁPIDA			
Ángulo de salida	°	12	12
Radio de curvatura	m	14	0.28
PAREDES LATERAL DERECHA			
Ángulo de convergencia	°	13.79	13.79
Altura de la pared	m	14.5	0.29
Longitud de pared	m	14.5	0.29

Tabla No 4.13 Datos generales de la alternativa A-1

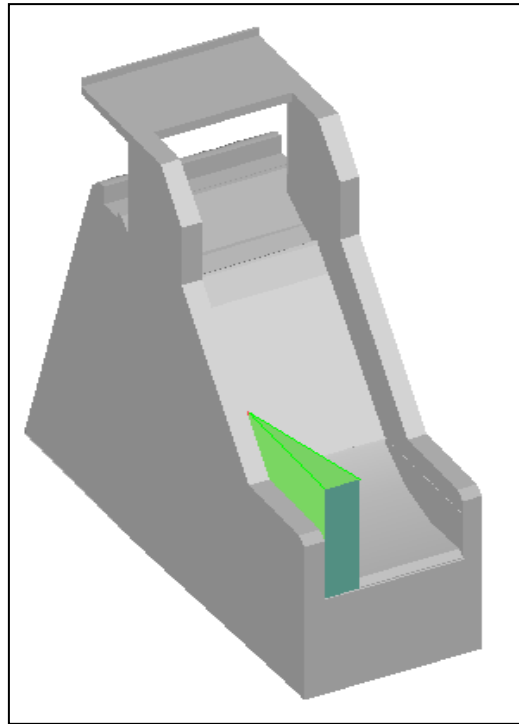


Figura No 4.9 Vista general en 3D de la alternativa A-1

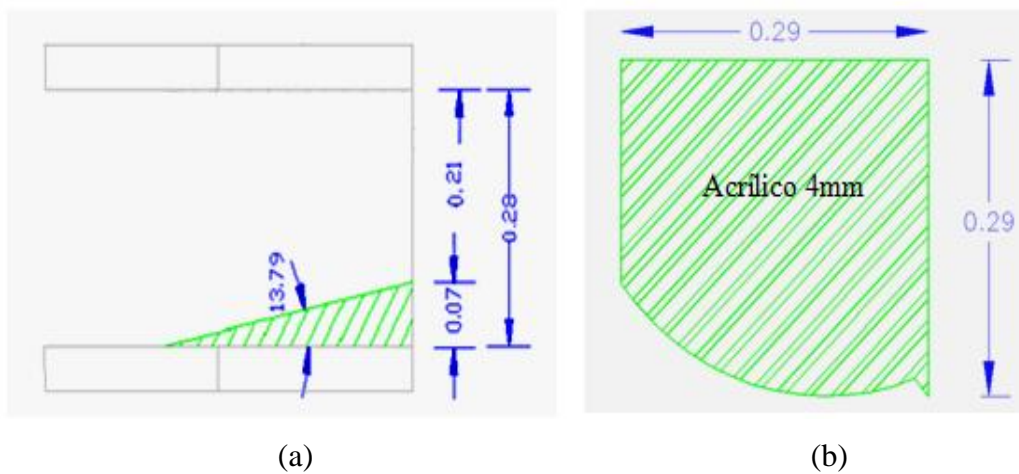


Figura No 4.10 (a) Dimensiones en planta alternativa A-1 (b) Dimensión de la pared de contracción derecha

Para esta alternativa se utilizó la pared de contracción derecha de la alternativa A, de tal forma que se retiró la pared de contracción izquierda y se realizó una limpieza de los residuos de silicón en el esquí obteniendo de esta manera una superficie completamente lisa, el ancho total de la salida del chorro es de 0.21m.



(a)



(b)

Fotografía No 4.14 (a) Colocación de nuevo silicón en las uniones de la pared lateral derecha (b) Vista de la alternativa A-1 construida en el modelo

4.2.3 ALTERNATIVA B : DEFLECTORES DE ALTURAS VARIABLES

Esta alternativa consiste en la implantación de tres deflectores de diferentes características geométricas que ocupan el ancho total del esquí del vertedero de excesos derecho. El deflector central tiene las mismas características geométricas que los deflectores del diseño original tanto en su ángulo de salida como en su radio de curvatura mientras que los deflectores derecho e izquierdo se modifican en 1.5 y 0.5 veces respectivamente del deflector central. Por lo tanto cada deflector tiene un radio de curvatura diferente, de tal manera que los chorros lanzados tendrán diferentes caracterizaciones.

En la tabla No 4.14 se resumen las características geométricas de esta modificación.

DESCRIPCIÓN	UNIDADES	PROTOTIPO	MODELO
VERTEDEROS DE EXCESOS DERECHO			
DEFLECTOR DERECHO			
Ángulo de salida	°	39.4	39.4
Radio	m	10.6	0.212
Altura(desde esquí)	m	4.77	0.0954
Ancho	m	4.67	0.0933
DEFLECTOR CENTRAL			
Ángulo de salida	°	36.4	36.4
Radio	m	10	0.20
Altura(desde esquí)	m	3.18	0.0636
Ancho	m	4.67	0.0933
DEFLECTOR IZQUIERDO			
Ángulo de salida	°	24.7	23.2
Radio	m	11.7	0.234
Altura(desde esquí)	m	1.59	0.0318
Ancho	m	4.67	0.0933

Tabla No 4.14 Datos generales de la alternativa B

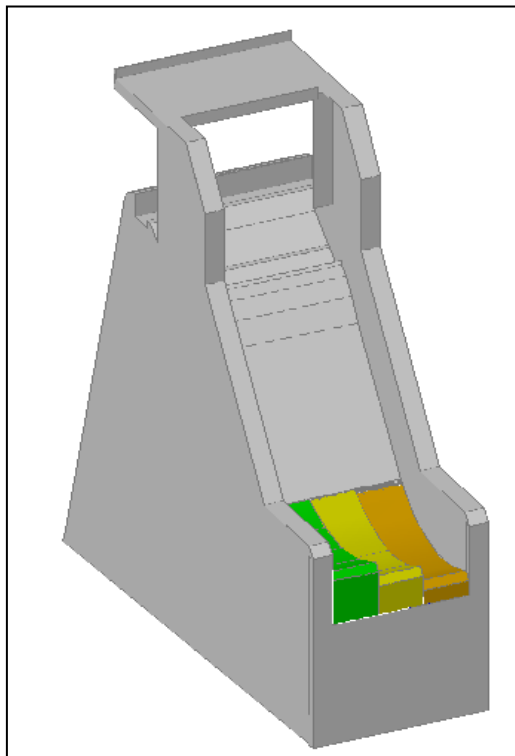


Figura No 4.11 Vista general en 3D de la alternativa B

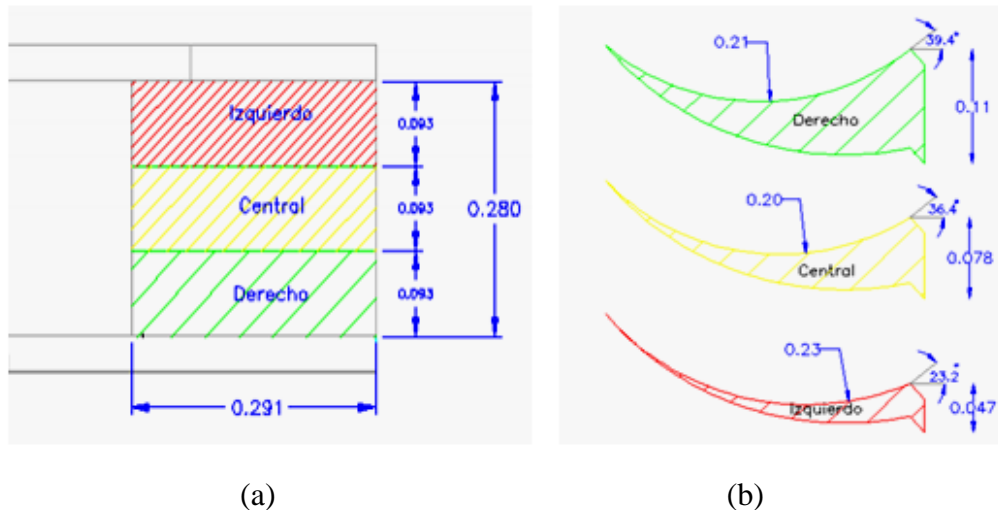
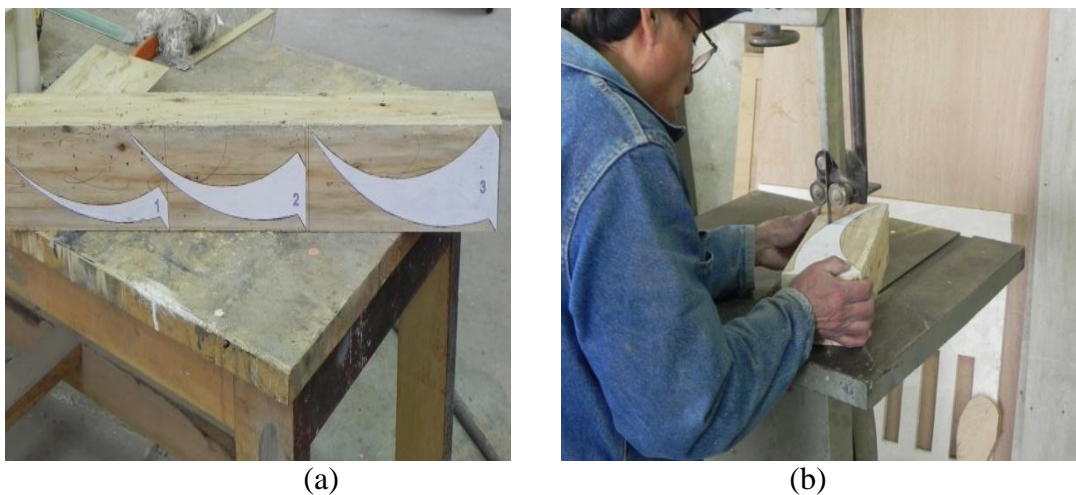


Figura No 4.12 (a) Dimensiones en planta alternativa B (b) Dimensiones de los tres deflectores de la alternativa B

Los deflectores se los construyó en madera, primeramente se obtuvo las plantillas de cada uno de los deflectores en escala modelo las mismas que nos sirvieron para recortar los moldes en los tabloncillos de madera de acuerdo a las dimensiones de cada deflector, una vez obtenidos los moldes se procedió a su sellado, masillado, lijado y pintado, de tal forma de obtener una superficie lisa sin fisuras garantizando su impermeabilización.

La instalación de los deflectores de madera sobre el esquí de acrílico se la realizó con silicón y para que no exista perturbación en el flujo debido a los bordes de los deflectores se colocó plastilina uniformizando de esta manera el perfil.



Fotografía No 4.15 (a) Colocación de las plantillas de los deflectores en el bloque de madera (b) Elaboración de los deflectores



(a)



(b)

Fotografía No 4.16 (a) Lijado de los deflectores después de ser sellados y masillados (b) Pintado de los deflectores



(a)



(b)

Fotografía No 4.17 (a) Instalación de cada uno de los deflectores (b) Vista de la alternativa B construida en el modelo

4.2.4 ALTERNATIVA C : DEFLECTOR PERALTADO

En esta alternativa se propone la construcción de un solo deflector peraltado que cubre todo el ancho del esquí. La pendiente transversal o peralte es de 17.86%, la parte más alta del deflector se tiene en el lado derecho y va descendiendo con la pendiente indicada hacia el lado izquierdo, se conserva el mismo radio de curvatura del deflector del diseño original

10 m. en prototipo y 0.20m en modelo. En la tabla No 4.15 se detallan las características geométricas de esta alternativa.

DESCRIPCIÓN	UNIDADES	PROTOTIPO	MODELO
VERTEDEROS DE EXCESOS DERECHO			
DEFLECTOR PERALTADO			
Ángulo de salida	°	37	37
Radio	m	10	0.20
Peralte	%	17.86	17.86
Altura de salida derecha	m	3.95	0.079
Altura de salida izquierda	m	1.45	0.029

Tabla No 4.15 Datos generales de la alternativa C

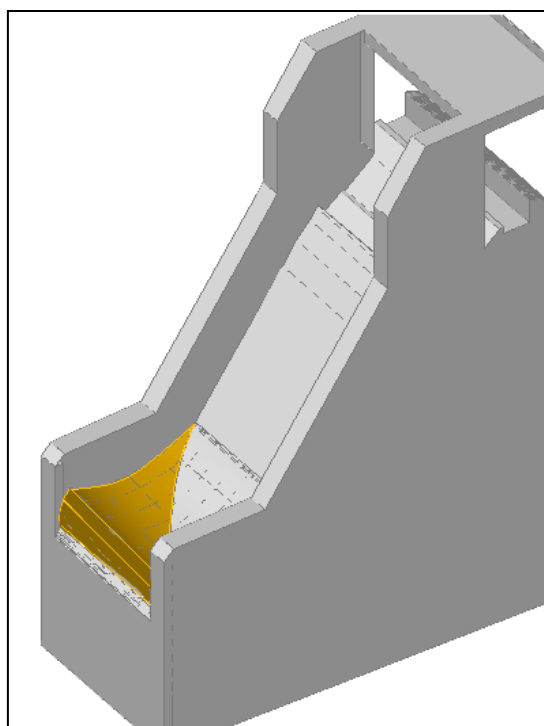


Figura No 4.13 Vista general en 3D de la alternativa C

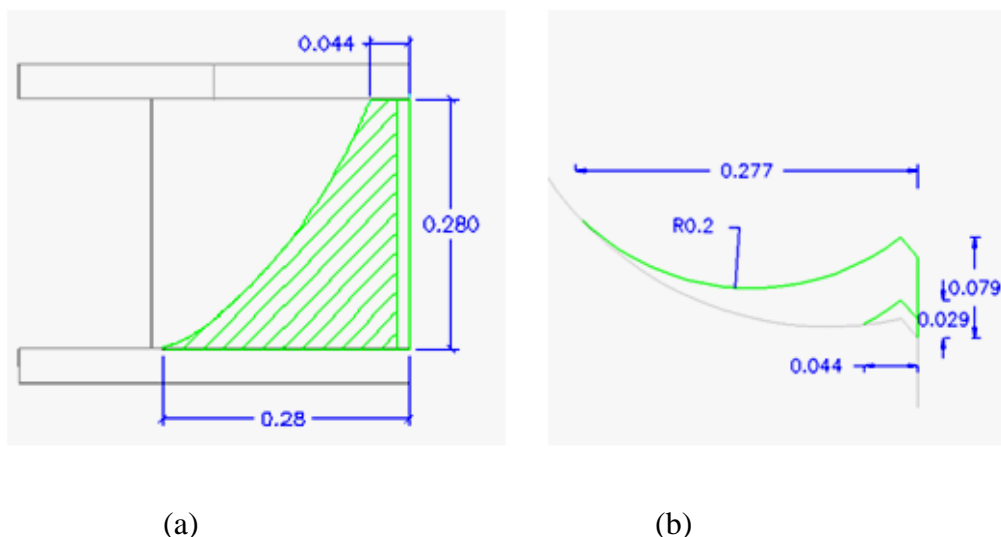


Figura No 4.14 (a) Dimensiones en planta alternativa C (b) Dimensiones en corte del deflector peraltado

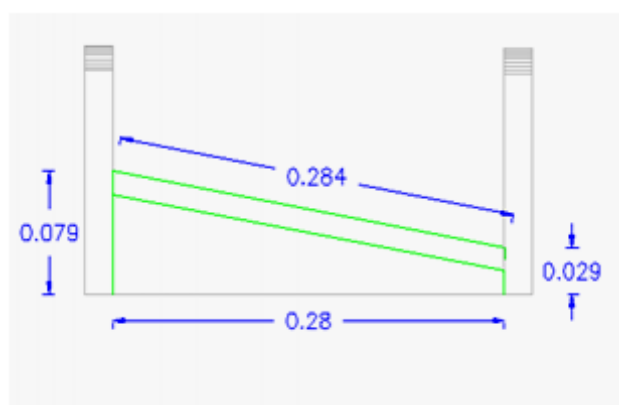


Figura No 4.15 Dimensiones de la vista frontal de la alternativa C

Una vez obtenidas las plantillas del deflector peraltado, estas las pegamos en un bloque de madera y procedemos a cortar en la máquina de cierra, para obtener las caras del deflector lisas y sin fisuras colocamos sellador y luego masilla mustang, posteriormente después de su secado lijamos el deflector de tal forma de perder las pequeñas rugosidades de la superficie, pintamos con laca color anaranjado de secado rápido.

Su montaje en el esquí del vertedero se lo realizó con silicón y en sus contornos plastilina.



(a)



(b)

Fotografía No 4.18 (a) Colocación de la plantilla y proceso de cortado (b) Obtención del molde peraltado



(a)



(b)

Fotografía No 4.19 (a) Instalación de la tapa frontal (b) Implantación total de la alternativa C

4.2.5 ALTERNATIVA D : DISEÑO ORIGINAL MODIFICADO

Esta modificación fue entregada por CELEC EP HIDROTOAPI a la Escuela Politécnica Nacional, con el objetivo de garantizar la seguridad de los taludes del cuenco de socavación. Para ello, se realizaron cambios en la geometría del salto en esquí, de los deflectores y en las paredes mediante una contracción para desviar el flujo hacia el eje central del cuenco. Las modificaciones geométricas consisten cambios en el radio de curvatura del salto en esquí y en su ángulo de salida, de 14 m a 12 m y de 12° a 20° , respectivamente.

Los deflectores son de forma trapezoidal que están dispuestos en la parte final del salto en esquí, estos permiten abrir el flujo en abanico para facilitar la aireación y la disipación de energía. El ángulo de salida de los deflectores en correspondencia a su labio de salida igual a 37° . La pared o muro lateral de contracción se ubica a la derecha de la salida del esquí de tal forma de tratar de que el chorro no impacte el talud derecho del cuenco de disipación. En la tabla No 4.15 se indican las dimensiones de la geometría de la alternativa D.

DESCRIPCIÓN	UNIDADES	PROTOTIPO	MODELO
VERTEDEROS DE EXCESOS DERECHO			
SALTO EN ESQUÍ DE RÁPIDA			
Ángulo de salida	°	20	20
Radio	m	12	0.24
DEFLECTORES			
Ángulo de salida	°	37	37
Radio	m	10	0.20
Ancho inferior	m	3.25	0.065
Ancho superior	m	2.75	0.055
Altura	m	3.15	0.063
PARED (CONTRACCIÓN)			
Longitud	m	14.50	0.29
Ancho	m	0.75	0.015
Altura	m	7.02	0.14

Tabla No 4.15 Datos generales de la alternativa D

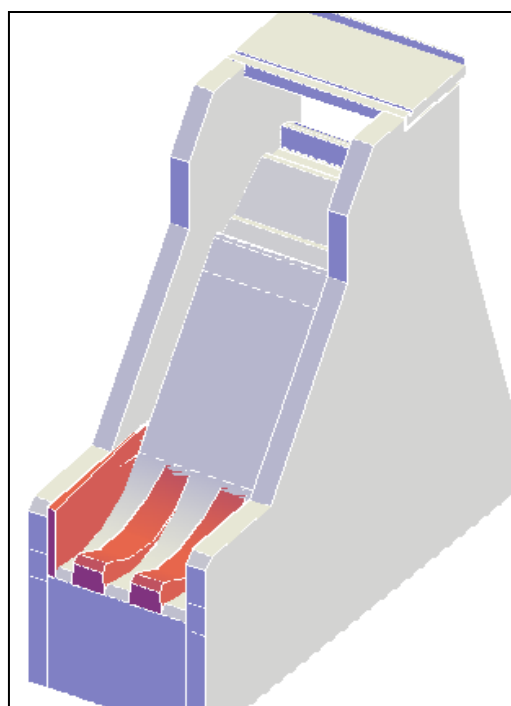


Figura No 4.16 Vista general en 3D de la alternativa D

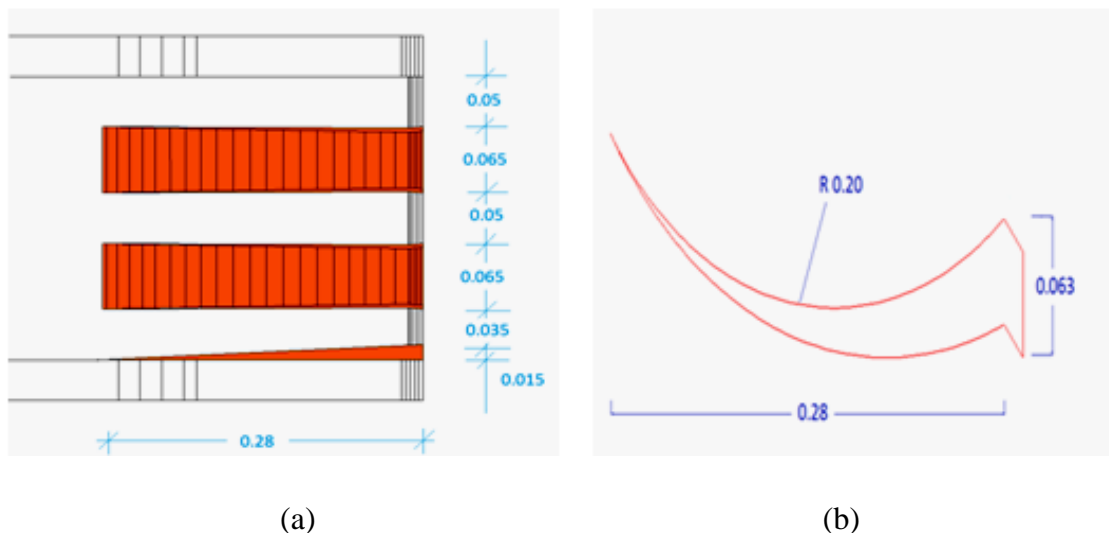


Figura No 4.17 (a) Dimensiones en planta alternativa D (b) Dimensiones en corte del deflector trapezoidal

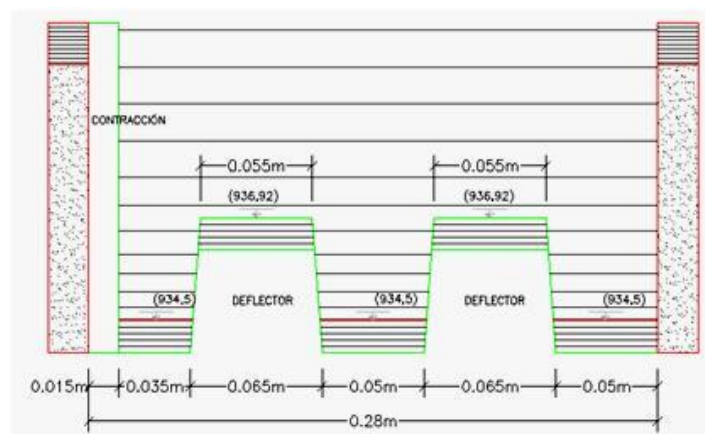


Figura No 4.18 Dimensiones de la vista frontal de la alternativa D

Colocamos las plantillas de los deflectores y esquí en la madera para recortar el molde, para obtener unas superficies lisas en el deflector y del esquí falso se coloca sellador de madera y luego masilla, posteriormente se ha lijado, luego pintamos el deflector con laca color anaranjado de secado rápido.

La pared de contracción se la elabora en acrílico de 4mm, en la cual se procede a pegar su respectiva plantilla para luego recortarla y pintarla.

Para la colocación en el modelo de la presa Toachi se retira la modificación anterior, se limpia los residuos y se coloca con silicón el esquí y sobre este los deflectores.



(a)

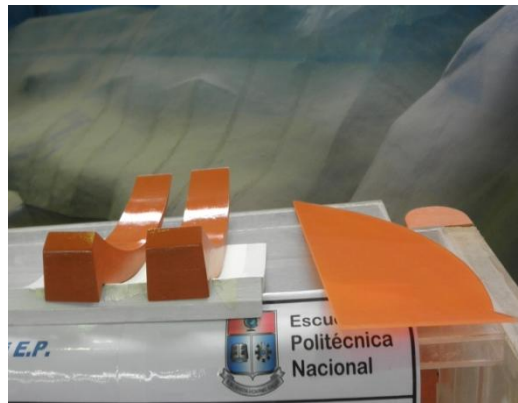


(b)

Fotografía No 4.20 (a) Colocación de la plantilla y proceso de cortado (b) Lijado del molde del esquí



(a)

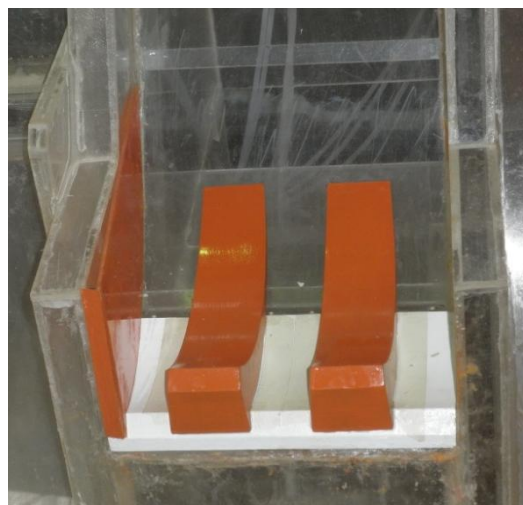


(b)

Fotografía No 4.21 (a) Lijado de los moldes de los deflectores (b) Esquí, deflectores y pared lateral terminados



(a)



(b)

Fotografía No 4.22 (a) Instalación de los deflectores y pared lateral (b) Implantación total de la alternativa D

4.3 INSTRUMENTACIÓN

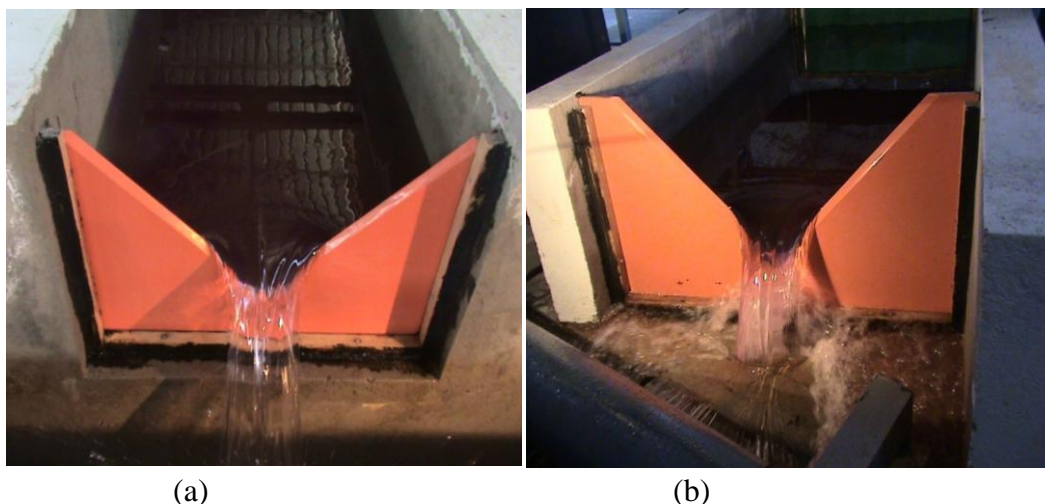
La instrumentación en un modelo físico es de suma importancia debido a que es a través de ella que se realizan las diferentes medidas experimentales y a su vez determinarán una correcta obtención de los resultados en el análisis del fenómeno hidráulico. En esta investigación los instrumentos utilizados son²³:

- Vertederos triangulares de 90° de pared delgada.
- Limnímetros.
- Cintas métricas o reglas.
- Estación total LEICA
- Nivel topográfico WILD

4.3.1 VERTEDERO TRIANGULAR DE 90° DE PARED DELGADA

Los vertederos triangulares son utilizados para medir los caudales de ingreso y salida del modelo mediante las curvas de descarga de cada vertedero en las cuales ingresamos el valor de la carga de agua en ese instante y conocemos el caudal.

Los vertederos fueron fabricados en madera de 18 milímetros de espesor, se los ubicó a la entrada en el canal de ingreso y otro a la salida en el canal de descarga, sus anchos son de 1.0 y 1.2 m respectivamente, el ángulo central es 90° y la altura desde el vértice hasta el canal es de 0.20m.



Fotografía No 4.23 (a) Vertedero triangular a la entrada (b) Vertedero triangular a la salida

²³ ESTUDIO EN MODELO HIDRÁULICO DE LA PRESA TOACHI Y SUS OBRAS COMPLEMENTARIAS. Informe técnico fase I, EPN. Quito, Noviembre 2011.

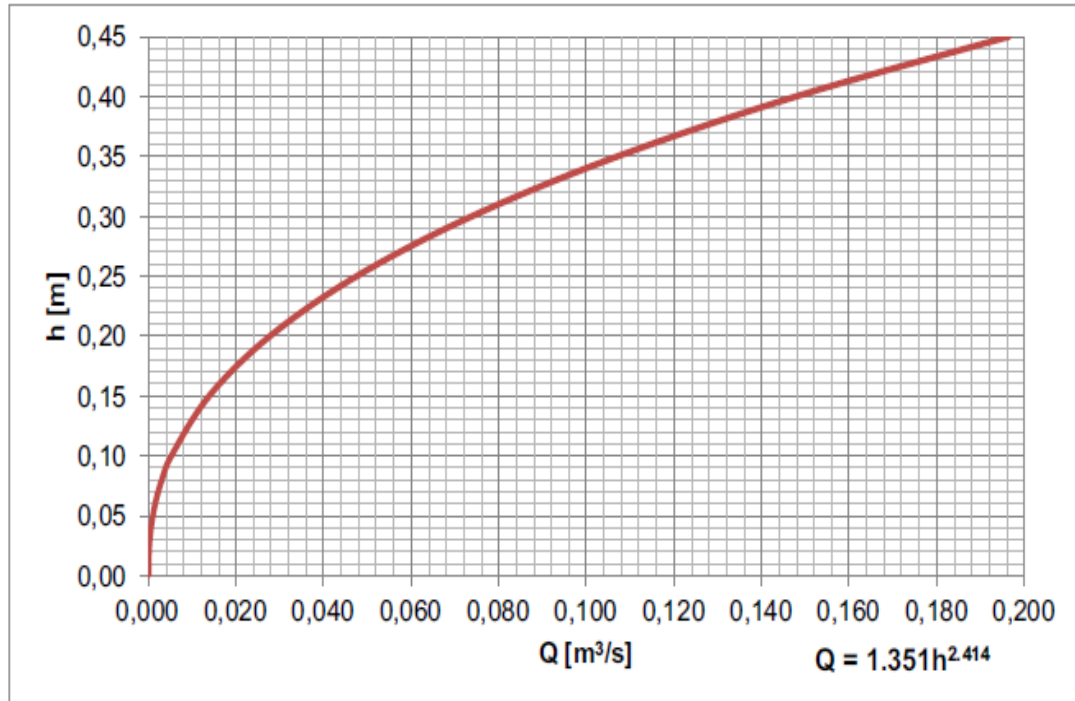


Gráfico No 4.1 Curva de descarga de los vertederos triangulares²⁴

4.3.2 LIMNÍMETROS

Los limnímetros son instrumentos de precisión que miden los calados, alturas o carga de agua sobre la cresta del vertedero, esta lectura (h) reemplazamos en la ecuación de la curva de descarga y obtenemos el caudal en ese instante.

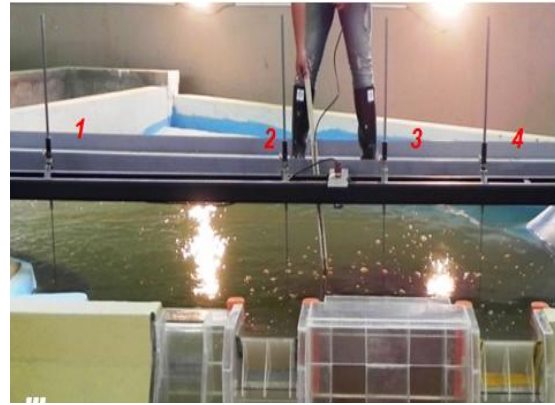
Los limnímetros se encuentran ubicados aguas arriba de los vertederos a una distancia de tres veces la altura de los vértices o sea aproximadamente 0.60 m, evitando de esta manera los efectos de la curva de remanso. La precisión de medida es de 0.1 mm.

En el modelo de la presa Toachi se han instalado 6 limnímetros: uno, aguas arriba de cada uno de los vertederos triangulares de aforo, cuatro, aguas arriba de la presa. En la fotografía No 4.24 se muestra los limnímetros instalados en el modelo.

²⁴ Velasco, C. Vera, P. "Estudio en modelo físico de la disipación de energía aguas debajo de los vertederos de excesos y desagües de fondo de la presa Toachi en el proyecto Toachi Pilatón". Tesis de grado. Quito 2012. Facultad de Ingeniería Civil-EPN



(a)

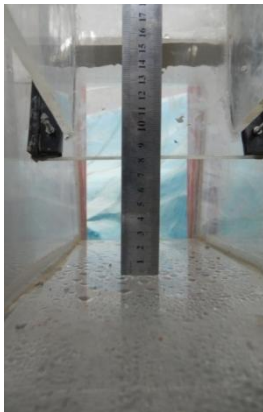


(b)

Fotografía No 4.24 (a) Limnómetro instalado en el canal de ingreso (b) Limnómetros instalados en el embalse

4.3.3 REGLAS Y CINTA MÉTRICA

Las reglas y cintas de medida con precisión de 1 milímetro permiten realizar mediciones longitudinales en el modelo como anchos, alturas, alcances de chorros. Además son de utilidad para registrar calados en el embalse y en la zona aguas abajo de la presa.



(a)



(b)



(c)

Fotografía No 4.25 (a) Regla metálica para medición de calados de agua en el vertedero y deflectores (b) Cinta de medida en el embalse (c). Cinta de medida en el cuenco de disipación para registrar el alcance de los chorros de descarga.

4.3.4 ESTACIÓN TOTAL LEICA

La estación total Leica se utilizó para realizar los levantamientos topográficos de las fosas de socavación en el cuenco de disipación producto del impacto del chorro de agua que es lanzado por el esquí y los deflectores del vertedero en cada una de las alternativas analizadas.



Fotografía No 4.26 Estación total LEICA utilizada para levantamientos topográficos

4.3.5 NIVEL TOPOGRÁFICO WILD

El nivel se utilizó en la comprobación de las cotas de las alternativas de los deflectores implantados garantizando con ello que las cotas en modelo como en prototipo sean las mismas.



Fotografía No 4.27 Nivel topográfico WILD

4.4 CONCLUSIONES

1. Todas las alternativas construidas en el esquí del vertedero de excesos derecho se trabajaron con la misma escala definida para el modelo de investigación de la presa Toachi escala 1:50, por lo tanto los efectos de escala como viscosidad y tensión superficial son descartados.
2. Se verificó que la geometría de las alternativas construidas en el modelo reproduce muy bien la geometría de base diseñada como prototipo. Es decir, el modelo físico cumple con la similitud geométrica requerida.
3. La verificación de la similitud dinámica para la operación del modelo se llevó a cabo al inicio de la Primera Fase de la Investigación Experimental de la Presa Toachi y sus Obras Complementarias, ejecutada por la EPN y reportada en los informes correspondientes antes mencionados²⁵. Así se demuestra que ésta permite alcanzar la similitud dinámica de los fenómenos bajo análisis, en el modelo operado bajo el criterio de similitud de Froude.
4. Las características geométricas de cada uno de los deflectores instalados en el esquí para el cambio de dirección del chorro están bien definidas las mismas que nos servirán para los cálculos teóricos del chorro y así compararlos con los resultados experimentales.
5. Se utilizó el mismo equipo e instrumentación empleado en el estudio experimental en modelo hidráulico de la presa Toachi, para la medición de magnitudes físicas necesarias para esta investigación.
6. Los materiales que se utilizaron para la construcción, fueron principalmente acrílico y madera, puesto que brindan facilidad constructiva en el moldeo de estructuras complejas como son los vertederos que presentan perfiles curvilíneos.
7. La mano de obra utilizada es especializada y con un amplia gama de experiencia, puesto que son modelos donde la precisión es un factor importante.

²⁵ ESTUDIO EN MODELO HIDRÁULICO DE LA PRESA TOACHI Y SUS OBRAS COMPLEMENTARIAS. Informe técnico fase I, EPN. Quito, Noviembre 2011.

CAPÍTULO V

5 PLAN DE PRUEBAS PARA LA INVESTIGACIÓN EXPERIMENTAL

5.1 PLAN DE PRUEBAS

Para esta investigación el plan de pruebas se lo dividió en dos grupos:

- Grupo 1; la operación individual del vertedero de excesos derecho comparando todas las alternativas planteadas con los deflectores del diseño original.
- Grupo II; La operación simultánea de los dos vertederos de excesos con los deflectores planteados en la alternativa D.

5.1.1 PLAN DE PRUEBAS GRUPO I

El análisis comparativo del comportamiento hidráulico de las alternativas se realiza observando las características del flujo del chorro como dirección, forma, alcance y una breve descripción de la fosa de socavación conformada para cada una de ellas cuando operan con dos caudales diferentes. Se han seleccionado los caudales de $400\text{m}^3/\text{s}$ y $600\text{m}^3/\text{s}$, que son los caudales de crecida en el sitio de la presa que corresponden a un tiempo de retorno de 100 y 10000 años respectivamente²⁶.

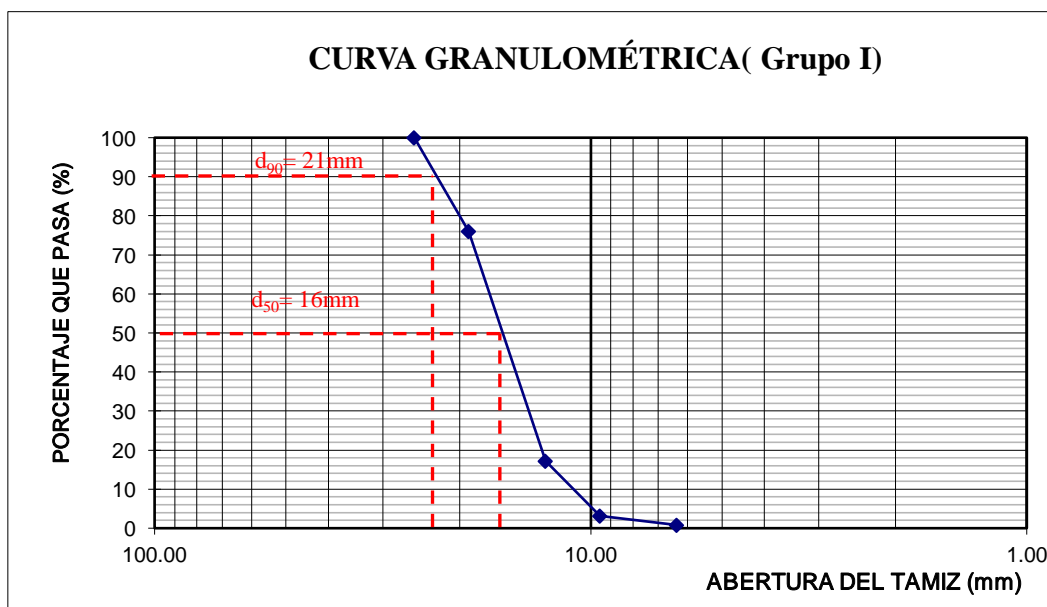
En todas las pruebas opera individualmente el vertedero de excesos derecho de la Presa Toachi. La operación del vertedero consiste en abatir la clapeta cuando el nivel en el embalse llegue al máximo de operación 970 msnm, la cota del material enrasado en el cuenco de disipación al pie de la presa corresponde 918.5 msnm, la granulometría del material pétreo da como resultado los diámetros d_{90} 21mm y d_{50} 16mm. En la tabla No.5.1 se indican los resultados del ensayo de granulometría y en la gráfica No.5.1 la curva granulométrica.

El cuenco de disipación de energía es el modificado en la segunda fase de la investigación cuyas dimensiones se encuentran descritas en la tabla No.4.7 del anterior capítulo.

²⁶ Hidrotoapi E.P “Proyecto hidroeléctrico Toachi- Pilatón . Presa Toachi. Hidráulica. Memoria de cálculo “. Quito.2009

TAMIZ No.	TAMAÑO ABERTURA (mm)	PESO RETENIDO (g)	PORCENTAJE RETENIDO (%)	PORCENTAJE ACUMULADO (%)	PORCENTAJE QUE PASA (%)
1"	25.400	0.0	0.0	0.0	100.0
3/4"	19.050	1584.0	24.0	24.0	76.0
1/2"	12.700	3888.0	58.9	82.8	17.2
3/8"	9.525	928.0	14.0	96.9	3.1
Nº4	6.350	156.0	2.4	99.2	0.8
BANDEJA		50.0	0.8	100.0	0.0
	TOTAL	6606.0			

Tabla No 5.1 Ensayo de granulometría del material pétreo



Gráfica No 5.1 Curva granulométrica del material pétreo del Grupo I.

En la siguiente tabla se detalla el plan de pruebas a realizarse y las observaciones a tomarse en cuenta para cada una de las alternativas.

NOMBRE	SIMBOLOGÍA	CAUDALES (m ³ /s)		OBSERVACIONES
		1	2	
DISEÑO ORIGINAL	O	400	600	Para todas las alternativas se mide la carga sobre el vertedero, a la salida en el esquí y si es posible en los deflectores.
ALTERNATIVA "A"	A	400	600	En los chorros se mide el alcance máximo, alcance mínimo, ancho, altura y se hace un análisis de la dirección del mismo.
ALTERNATIVA "A1"	A1	-----	600	Se registra el nivel de agua en el cuenco disipador. Levantamiento topográfico de la fosa de socavación
ALTERNATIVA "B"	B	400	600	
ALTERNATIVA "C"	C	400	600	
ALTERNATIVA "D"	D	400	600	

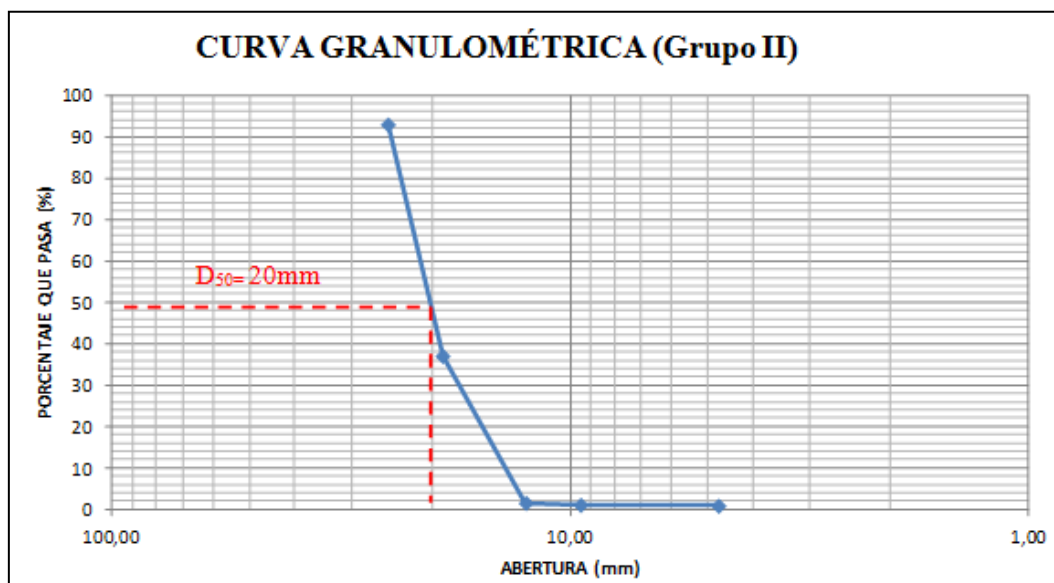
Tabla No 5.2 Plan de pruebas Grupo I

5.1.2 PLAN DE PRUEBAS GRUPO II

En estas pruebas se operan simultáneamente los dos vertederos de excesos de la Presa Toachi. La operación consiste en abatir las clapetas de los dos vertederos cuando el nivel en el embalse llegue al máximo de operación 970 msnm, la cota del material enrasado en el cuenco de disipación al pie de la presa corresponde 918.5 msnm, la granulometría de

este nuevo material pétreo da como resultado el diámetro d_{50} 20mm. En la gráfica No.5.2 la curva granulométrica.

Se analiza el comportamiento del flujo del chorro como dirección, forma, alcance, altura y una breve descripción de las fosas de socavación conformadas para serie de cinco caudales con la alternativa D. La serie de caudales seleccionados son obtenidos de la tabla No.5.3 Caudales de crecida en el sitio de la presa Toachi.²⁷



Gráfica No 5.2 Curva granulométrica del material pétreo del Grupo II.

Tiempo de retorno (años)	Caudal de crecida (m ³ /s)
2	381
5	485
10	555
25	640
50	703
100	763
500	904
1000	965
10000	1196

Tabla No 5.3 Caudales de crecida en el sitio de la presa Toachi

²⁷ Hidrotoapi E.P “Proyecto hidroeléctrico Toachi- Pilatón . Presa Toachi. Hidráulica. Memoria de cálculo “. Quito.2009

En la siguiente tabla se indica el plan de pruebas realizado para el Grupo II:

NOMBRE	SIMBOLOGÍA	CAUDALES		OBSERVACIONES
		Qm (l/s)	Qp (m ³ /s)	
Alternativa D (Deflectores y contracción)	D _A	67.882	1200	Se registra los calados sobre el vertedero a la salida en el esquí y si es posible en los deflectores.
	D _B	56.569	1000	En los chorros se mide el alcance máximo, alcance mínimo, ancho, altura y se hace un análisis de la dirección del mismo.
	D _C	39.598	700	
	D _D	28.284	500	Se registra el nivel de agua en el cuenco disipador.
	D _E	11.314	200	Levantamiento topográfico de la fosa de socavación

Tabla No 5.4 Plan de pruebas Grupo II

5.2 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1. Puede inducirse errores en las mediciones tanto en calados de agua como en las características hidrodinámicas del chorro ya que estas se las realiza de manera visual y a su vez los modelos pueden estar sometidos a fuerzas de deformación en el momento de la medición.
2. Toda la serie de caudales establecidos en los planes de prueba tanto del Grupo I como de II, fueron fundamentados en el estudio hidrológico del de la presa, en los cuales se tiene caudales con período de retorno de hasta 10000 años.
3. Se ha considerado la incidencia del denominado tiempo morfológico en el modelo que es de aproximadamente dos horas de funcionamiento garantizando de esta manera que se alcancen las profundidades potenciales máximas en el cuenco de disipación.

4. El diámetro del material suelto, grava fina, indicado para cada grupo del plan de pruebas se mantiene constante en todas las pruebas para de esta manera realizar una comparación de resultados entre ellas.
5. Cuando realicemos las mediciones de los diferentes parámetros en el vertedero y en los chorros se debe realizar por lo menos tres veces la misma medición para reducir el error en la medición.
6. El plan de pruebas del Grupo I utiliza un material pétreo con diámetro medio de 16mm obtenido de la curva granulométrica, mientras que para el plan del pruebas del Grupo II se utilizó un material pétreo con diámetro medio de 20mm.

CAPÍTULO VI

6 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DEL CHORRO DESDE LOS SALTOS EN ESQUÍ

6.1 PRESENTACIÓN DE LOS RESULTADOS DE LAS ALTERNATIVAS CON EL DISEÑO ORIGINAL (GRUPO I)

Una vez culminado la investigación experimental de todas las alternativas para lograr el cambio de dirección de chorro, se presentan los resultados experimentales obtenidos de cada escenario en forma resumida.

En la tabla No.6.1 se presenta la comparación entre los valores de los caudales teóricos expuestos en el plan de pruebas con los caudales reales que se ingresaron al modelo.

PRUEBA	Q_p (Plan)	$Q_{m(real)}$	$Q_{p(real)}$	DIFERENCIA
	m ³ /s	l/s	m ³ /s	%
O ₁	400	22.51	398.00	0.5
A ₁	400	22.46	397.00	0.8
B ₁	400	22.80	403.00	0.7
C ₁	400	22.78	402.80	0.7
D ₁	400	22.40	395.60	1.1
O ₂	600	33.65	594.80	0.9
A ₂	600	34.25	605.40	0.9
A1 ₂	600	34.29	606.10	1.0
B ₂	600	34.28	606.00	1.0
C ₂	600	33.98	600.80	0.1
D ₂	600	33.87	598.80	0.2

Tabla No 6.1 Comparación entre caudales reales ensayados con caudales planeados Grupo

I

Se puede observar que para todas las pruebas se tiene variaciones máximas de caudal del 1.1% con respecto a los caudales planeados, por lo tanto se puede decir que están dentro de los límites aceptables. En la siguiente figura se observa la trayectoria del chorro a la salida del vertedero de excesos y su efecto en el cuenco disipador, los parámetros a medirse experimentalmente son las características hidrodinámicas del chorro como alcances tanto

del esquí como de los deflectores y altura la máxima, a su vez las cargas de agua en el vertedero y en el cuenco dissipador y profundidad máxima de socavación.

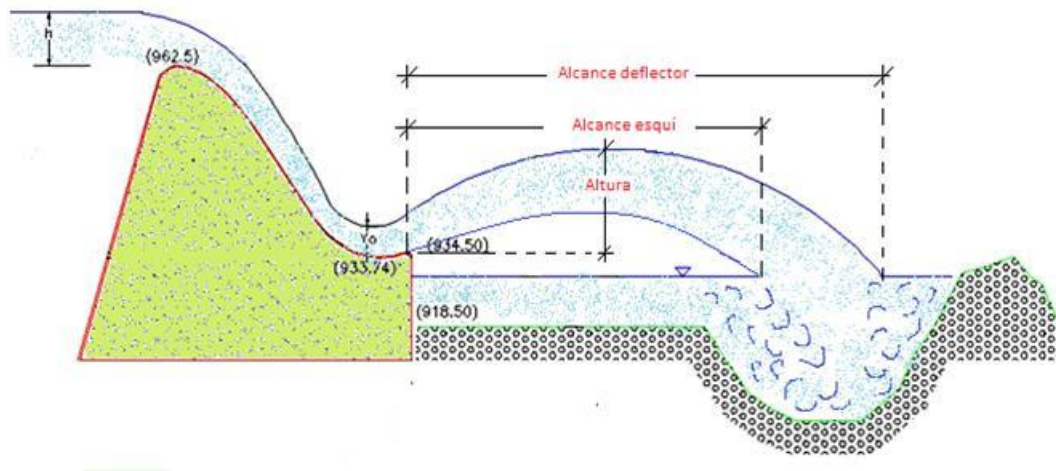
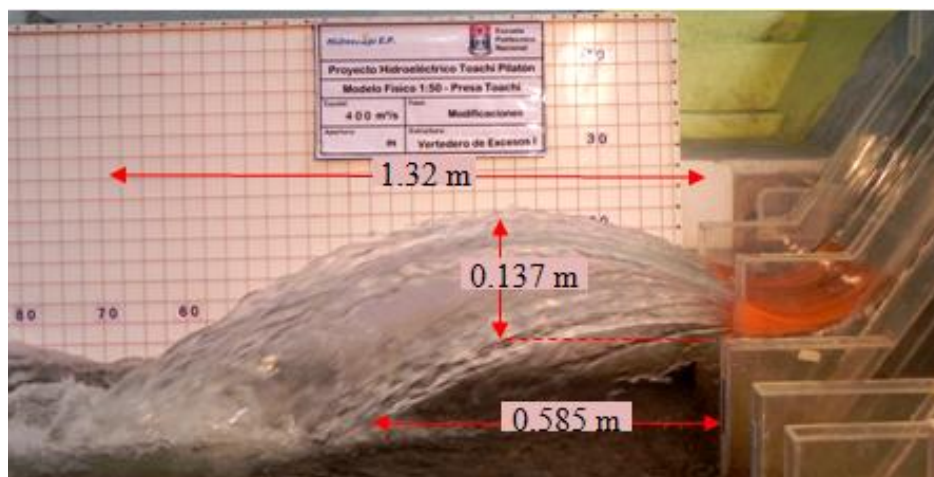


Figura No 6.1 Trayectoria del chorro y sus parámetros a medirse

6.1.1 PRUEBA O₁ (DEFLECTORES DISEÑO ORIGINAL $Q=398\text{m}^3/\text{s}$)

En esta prueba por efecto de la ubicación de los deflectores en el esquí se producen múltiples chorros lanzados desde los deflectores y del esquí en los cuales existe una inmersión de aire durante la trayectoria del chorro existiendo una disipación de energía considerable.



Fotografía No 6.1 Trayectoria del chorro prueba O₁

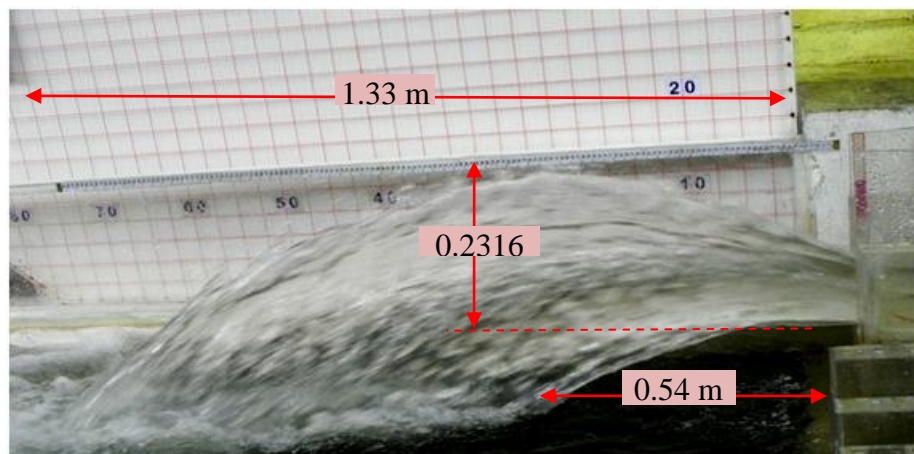
En la siguiente tabla se indican los parámetros más relevantes medidos experimentalmente en el modelo.

DESCRIPCIÓN	UNIDADES	PROTOTIPO	MODELO
PRUEBA O₁			
Chorro de descarga			
Alcance mayor	m	66	1.32
Alcance menor	m	29.25	0.585
Altura máxima	m	6.83	0.1366
Calados de agua			
Carga sobre la cresta	m	3.9	0.078
Carga sobre el perfil	m	1.95	0.039
Calado en el cuenco	m	7.35	0.147
Cuenca de socavación			
Profundidad de socavación	m	11.7	0.234

Tabla No 6.2 Resultados experimentales prueba O₁

6.1.2 PRUEBA A₁ (DEFLECTORES ALTERNATIVA A $Q=397\text{m}^3/\text{s}$)

Debido a las paredes convergentes se observa que el calado de agua en el esquí se eleva considerablemente produciendo que el chorro lanzado sea de forma plana vertical manteniendo la dirección del eje del vertedero de excesos, la introducción de aire en el chorro es insignificante ya que es un chorro compacto.



Fotografía No 6.2 Trayectoria del chorro prueba A₁

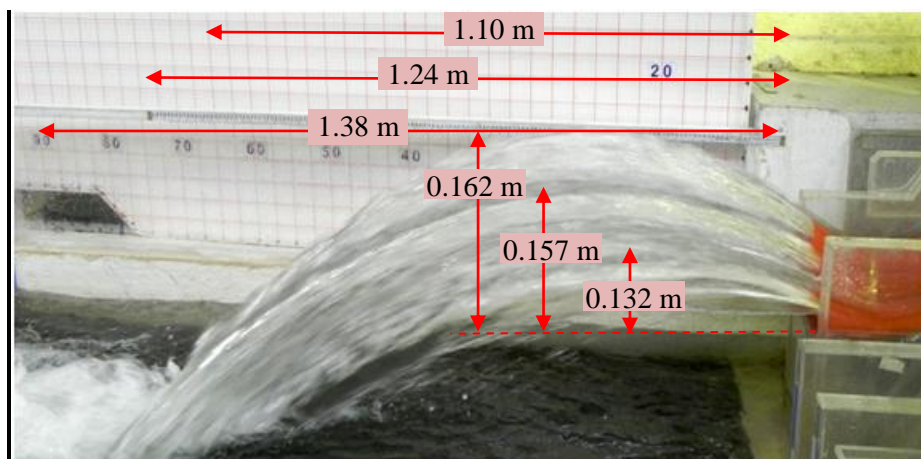
En la siguiente tabla se indican los parámetros más relevantes medidos experimentalmente en el modelo.

DESCRIPCIÓN	UNIDADES	PROTOTIPO	MODELO
PRUEBA A₁			
Chorro de descarga			
Alcance mayor	m	66.5	1.33
Alcance menor	m	27.0	0.54
Altura máxima	m	11.58	0.2316
Calados de agua			
Carga sobre la cresta	m	3.9	0.078
Carga sobre el perfil	m	1.8	0.036
Calado en el cuenco	m	8.0	0.16
Cuenco de socavación			
Profundidad de socavación	m	10.5	0.21

Tabla No 6.3 Resultados experimentales prueba A₁

6.1.3 PRUEBA B₁ (DEFLECTORES ALTERNATIVA B $Q=403\text{m}^3/\text{s}$)

El chorro de descarga tiene una forma inclinada hacia el eje del cuenco disipador ya que cada deflector produce un chorro con diferentes características hidrodinámicas debido a sus ángulos de despegue diferentes, existe también una buena aireación en el flujo debido a las diferentes alturas de los deflectores produciendo una disipación de energía satisfactoria.



Fotografía No 6.3 Trayectoria del chorro prueba B₁

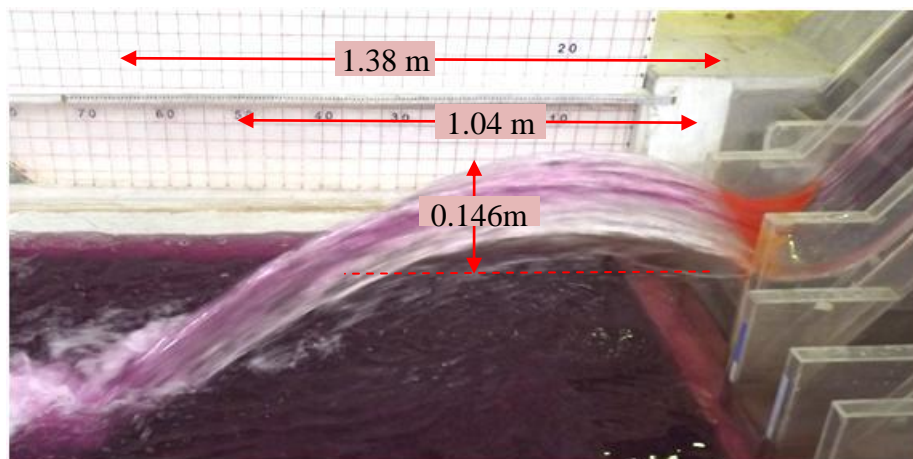
En la siguiente tabla se indican los parámetros más relevantes medidos experimentalmente en el modelo.

DESCRIPCIÓN	UNIDADES	PROTOTIPO	MODELO
PRUEBA B₁			
Chorro de descarga			
Alcance máximo derecho	m	55.0	1.10
Alcance máximo central	m	62.0	1.24
Alcance máximo izquierdo	m	69.0	1.38
Altura máxima derecho	m	8.05	0.1616
Altura máxima central	m	7.83	0.1566
Altura máxima izquierdo	m	6.58	0.1316
Calados de agua			
Carga sobre la cresta	m	3.85	0.077
Carga sobre el perfil	m	1.75	0.035
Calado en el cuenco	m	5.35	0.107
Cuenca de socavación			
Profundidad de socavación	m	10.5	0.21

Tabla No 6.4 Resultados experimentales prueba B₁

6.1.4 PRUEBA C₁ (DEFLECTORES ALTERNATIVA C $Q=402.8\text{m}^3/\text{s}$)

Esta alternativa es la que más tiende a desviar su flujo al centro del cuenco disipador debido a su geometría el mayor alcance se presenta en la parte más baja del deflector que es en el lado izquierdo puesto que tiene mayor velocidad de despegue.



Fotografía No 6.4 Trayectoria del chorro prueba C₁

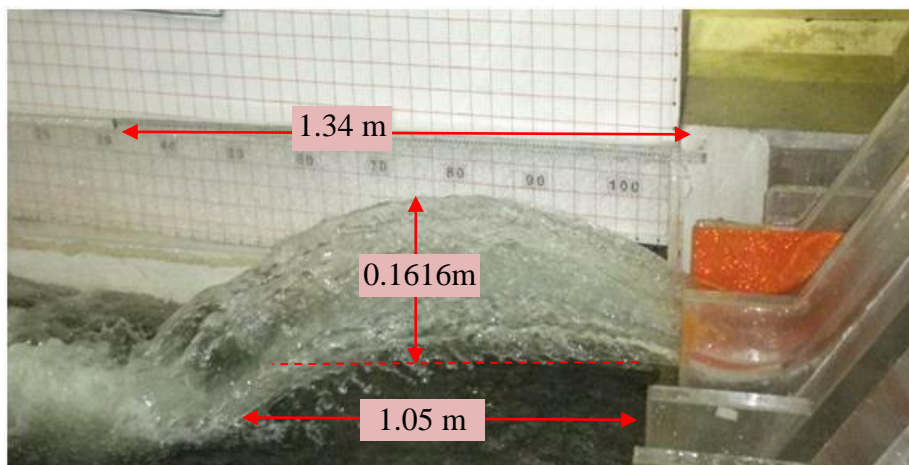
En la siguiente tabla se indican los parámetros más relevantes medidos experimentalmente en el modelo.

DESCRIPCIÓN	UNIDADES	PROTOTIPO	MODELO
PRUEBA C₁			
Chorro de descarga			
Alcance mayor	m	69.0	1.38
Alcance menor	m	52.0	1.04
Altura máxima promedio	m	7.33	0.1466
Calados de agua			
Carga sobre la cresta	m	4.0	0.08
Carga sobre el perfil	m	1.65	0.033
Calado en el cuenco	m	7.0	0.14
Cuenca de socavación			
Profundidad de socavación	m	10.8	0.216

Tabla No 6.5 Resultados experimentales prueba C₁

6.1.5 PRUEBA D₁ (DEFLECTORES ALTERNATIVA D Q=395.6m³/s)

La contracción de esta alternativa produce una desviación mínima del chorro hacia el centro del cuenco disipador, el alcance máximo del chorro es el lanzado por los deflectores los mismos que abren el flujo en abanico facilitando mayor área de contacto con el aire, disipando muy bien la energía.



Fotografía No 6.5. Trayectoria del chorro prueba D₁

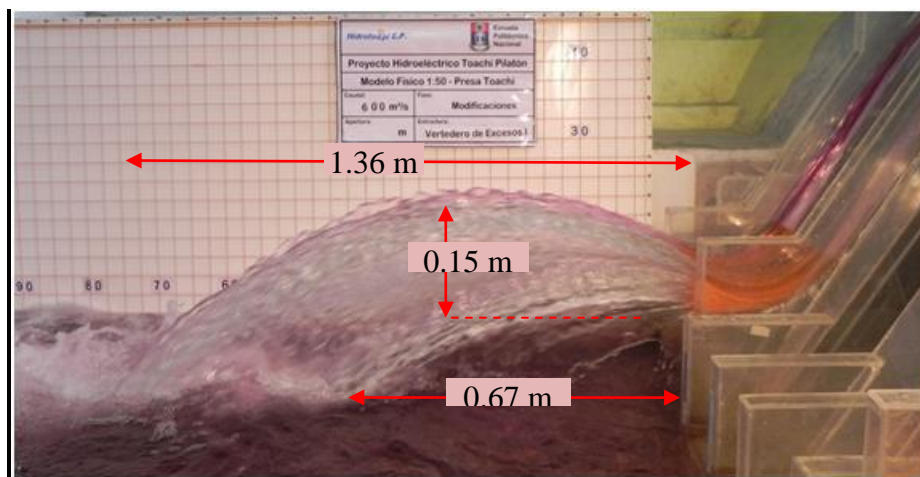
En la siguiente tabla se indican los parámetros más relevantes medidos experimentalmente en el modelo.

DESCRIPCIÓN	UNIDADES	PROTOTIPO	MODELO
PRUEBA D₁			
Chorro de descarga			
Alcance mayor	m	67.0	1.34
Alcance menor	m	52.5	1.05
Altura máxima	m	8.08	0.1616
Calados de agua			
Carga sobre la cresta	m	3.75	0.075
Carga sobre el perfil	m	1.8	0.036
Calado en el cuenco	m	6.0	0.12
Cuenca de socavación			
Profundidad de socavación	m	11.8	0.216

Tabla No 6.6 Resultados experimentales prueba D₁

6.1.6 PRUEBA O₂ (DEFLECTORES DISEÑO ORIGINAL Q=595m³/s)

El chorro se comporta de la misma manera que en la prueba O₁, debido a que el caudal aumenta las características hidrodinámicas del chorro también.



Fotografía No 6.6 Trayectoria del chorro prueba O₂

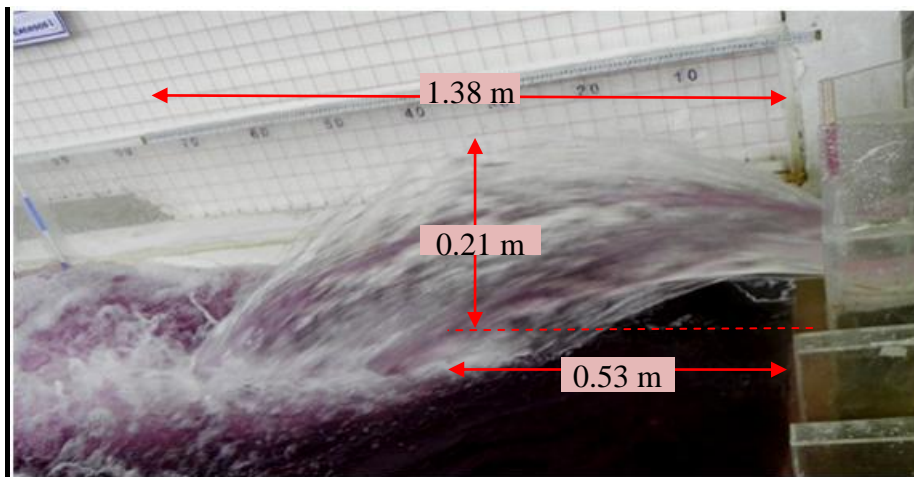
En la siguiente tabla se indican los parámetros más relevantes medidos experimentalmente en el modelo.

DESCRIPCIÓN	UNIDADES	PROTOTIPO	MODELO
PRUEBA O₂			
Chorro de descarga			
Alcance mayor	m	68.0	1.36
Alcance menor	m	33.5	0.67
Altura máxima	m	7.5	0.15
Calados de agua			
Carga sobre la cresta	m	4.95	0.099
Carga sobre el perfil	m	2.4	0.048
Calado en el cuenco	m	8.0	0.16
Cuenca de socavación			
Profundidad de socavación	m	10.2	0.204

Tabla No 6.7 Resultados experimentales prueba O₂

6.1.7 PRUEBA A₂ (DEFLECTORES ALTERNATIVA A Q=605.45m³/s)

El chorro se comporta de la misma manera que en la prueba A₁, debido a que el caudal aumenta las características hidrodinámicas del chorro también.



Fotografía No 6.7 Trayectoria del chorro prueba A₂

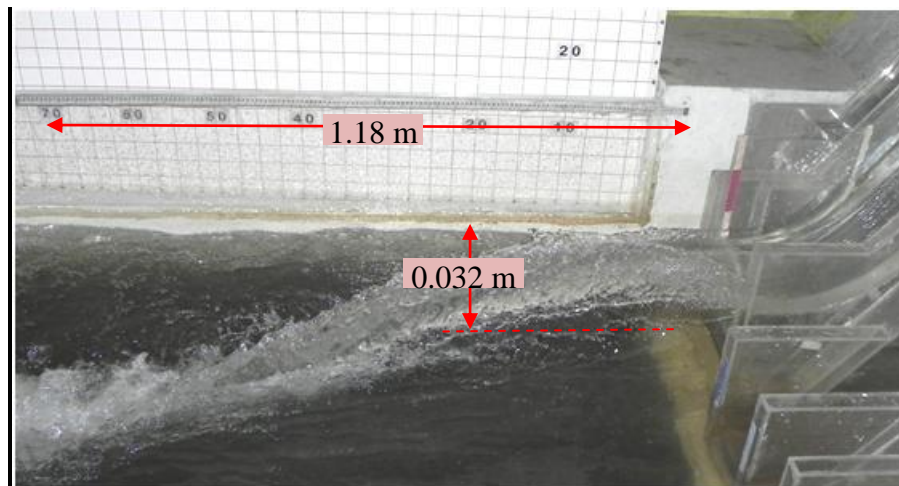
En la siguiente tabla se indican los parámetros más relevantes medidos experimentalmente en el modelo.

DESCRIPCIÓN	UNIDADES	PROTOTIPO	MODELO
PRUEBA A₂			
Chorro de descarga			
Alcance mayor	m	69.0	1.38
Alcance menor	m	26.25	0.525
Altura máxima	m	10.35	0.207
Calados de agua			
Carga sobre la cresta	m	5.1	0.102
Carga sobre el perfil	m	1.75	0.035
Calado en el cuenco	m	9.0	0.18
Cuenca de socavación			
Profundidad de socavación	m	13.3	0.266

Tabla No 6.8 Resultados experimentales prueba A₂

6.1.8 PRUEBA A1₂ (DEFLECTOR ALTERNATIVA A1 Q=606.10m³/s)

El chorro de esta alternativa debido a la presencia de la pared lateral derecha tiende a desviarse hacia el centro del cuenco disipador, pero al no haber la adecuada interacción del flujo con el aire este produce un gran efecto de socavación y arrastre de material.



Fotografía No 6.8 Trayectoria del chorro prueba A1₂

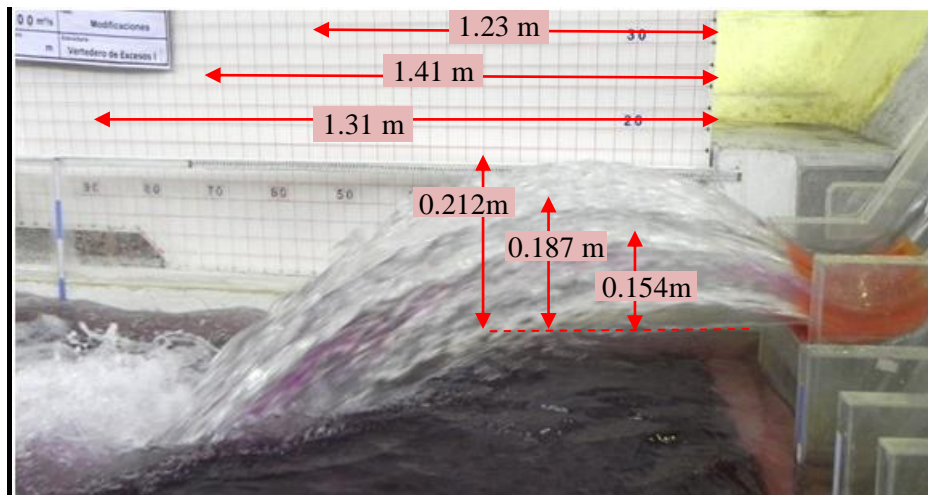
En la siguiente tabla se indican los parámetros más relevantes medidos experimentalmente en el modelo.

DESCRIPCIÓN	UNIDADES	PROTOTIPO	MODELO
PRUEBA A1₂			
Chorro de descarga			
Alcance mayor	m	59.0	1.18
Altura máxima	m	1.60	0.032
Calados de agua			
Carga sobre la cresta	m	5.35	0.107
Carga sobre el perfil	m	1.90	0.038
Calado en el cuenco	m	9.0	0.18
Cuenca de socavación			
Profundidad de socavación	m	15.3	0.306

Tabla No 6.9 Resultados experimentales prueba A1₂

6.1.9 PRUEBA B₂ (DEFLECTORES ALTERNATIVA B $Q=606.12\text{m}^3/\text{s}$)

El chorro se comporta de la misma manera que en la prueba A₁, debido a que el caudal aumenta las características hidrodinámicas del chorro también.



Fotografía No 6.9 Trayectoria del chorro prueba B₂

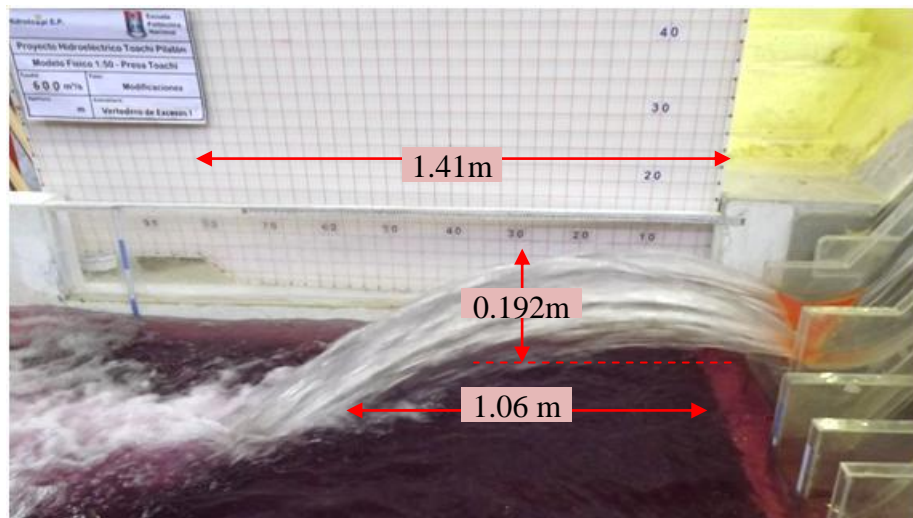
En la siguiente tabla se indican los parámetros más relevantes medidos experimentalmente en el modelo.

DESCRIPCIÓN	UNIDADES	PROTOTIPO	MODELO
PRUEBA B₂			
Chorro de descarga			
Alcance máximo derecho	m	61.5	1.23
Alcance máximo central	m	70.5	1.41
Alcance máximo izquierdo	m	65.5	1.31
Altura máxima derecho	m	10.6	0.212
Altura máxima central	m	9.35	0.187
Altura máxima izquierdo	m	7.70	0.154
Calados de agua			
Carga sobre la cresta	m	5.25	0.105
Carga sobre el perfil	m	2.5	0.05
Calado en el cuenco	m	7.4	0.148
Cuenca de socavación			
Profundidad de socavación	m	11.4	0.228

Tabla No 6.10 Resultados experimentales prueba B₂

6.1.10 PRUEBA C₂ (DEFLECTORES ALTERNATIVA C $Q=600.77\text{m}^3/\text{s}$)

El chorro se comporta de la misma manera que en la prueba C₁, debido a que el caudal aumenta las características hidrodinámicas del chorro también.



Fotografía No 6.10 Trayectoria del chorro prueba C₂

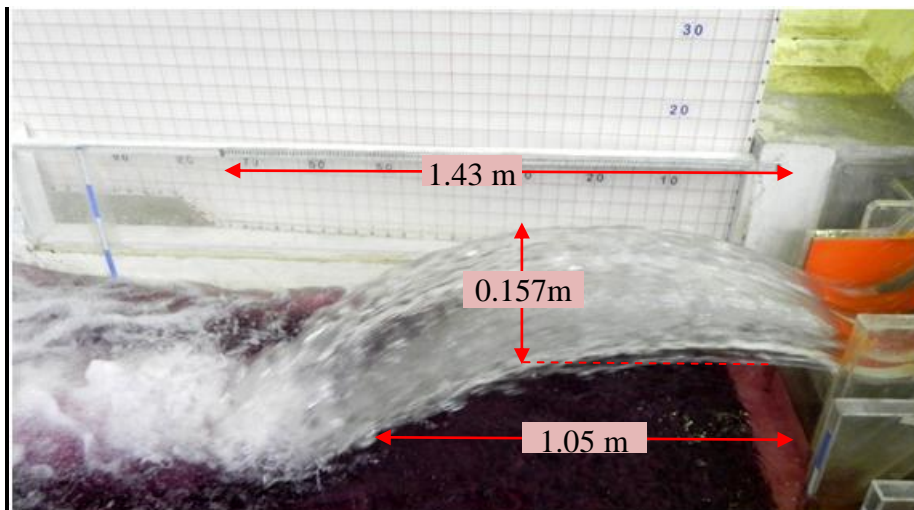
En la siguiente tabla se indican los parámetros más relevantes medidos experimentalmente en el modelo.

DESCRIPCIÓN	UNIDADES	PROTOTIPO	MODELO
PRUEBA C₂			
Chorro de descarga			
Alcance mayor	m	70.5	1.41
Alcance menor	m	53.0	1.06
Altura máxima derecha	m	6.08	0.1216
Altura máxima izquierda	m	9.58	0.1916
Calados de agua			
Carga sobre la cresta	m	5.0	0.10
Carga sobre el perfil	m	2.5	0.05
Calado en el cuenco	m	8.0	0.16
Cuenca de socavación			
Profundidad de socavación	m	12.13	0.24

Tabla No 6.11 Resultados experimentales prueba C₂

6.1.11 PRUEBA D₂ (DEFLECTORES ALTERNATIVA D Q=598.80m³/s)

El chorro se comporta de la misma manera que en la prueba D₁, debido a que el caudal aumenta las características hidrodinámicas del chorro también.



Fotografía No 6.11 Trayectoria del chorro prueba D₂

En la siguiente tabla se indican los parámetros más relevantes medidos experimentalmente en el modelo.

DESCRIPCIÓN	UNIDADES	PROTOTIPO	MODELO
PRUEBA D₂			
Chorro de descarga			
Alcance mayor	m	71.25	1.425
Alcance menor	m	52.25	1.045
Altura máxima	m	7.83	0.1566
Calados de agua			
Carga sobre la cresta	m	4.75	0.095
Carga sobre el perfil	m	2.75	0.055
Calado en el cuenco	m	8.0	0.16
Cuenca de socavación			
Profundidad de socavación	m	12.6	0.252

Tabla No 6.12 Resultados experimentales prueba D₂

6.2 PRESENTACIÓN DE LOS RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DEL GRUPO II

En este grupo de pruebas se tuvo que medir experimentalmente las características hidrodinámicas de los chorros lanzados de los dos vertederos de excesos que conforman la presa Toachi.

En la tabla No.6.13 se presenta la comparación entre los valores de los caudales teóricos expuestos en el plan de pruebas con los caudales reales que se ingresaron al modelo.

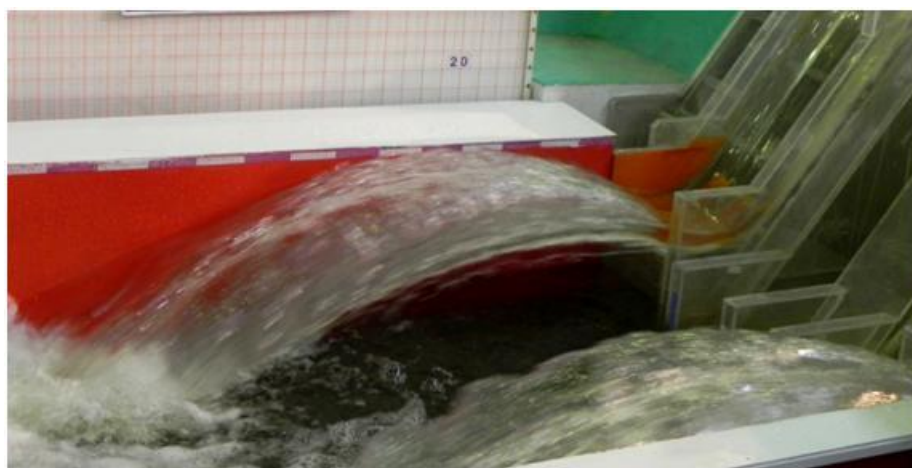
PRUEBA	Q _p (Plan)	Q _m (real)	Q _p (real)	DIFERENCIA
	m ³ /s	l/s	m ³ /s	%
D ₁	1200	68.06	1203.12	0.3
D ₂	1000	56.71	1002.57	0.3
D ₃	700	39.67	701.32	0.2
D ₄	500	28.26	499.57	0.1
D ₅	200	11.19	197.89	1.1

Tabla No 6.13 Comparación entre caudales reales ensayados con caudales planeados
Grupo II

Se observa que las variaciones entre caudales no superan el 1.1%, por lo tanto se puede decir que están dentro de los límites aceptables.

6.2.1 PRUEBA D_A (DEFLECTORES ALTERNATIVA D Q=1203.12m³/s)

Se observa que al funcionar los dos vertederos de excesos los chorros lanzados por cada uno de ellos son similares en su dirección, alcance y altura. Se concluye que las características hidrodinámicas de los chorros son proporcionales al caudal de ingreso. En la tabla No.6.14 se muestran los resultados experimentales.



Fotografía No 6.12 Trayectoria de los chorros prueba D_A

DESCRIPCIÓN	UNIDADES	PROTOTIPO	MODELO		
PRUEBA D _A					
Chorro de descarga vertedero		Der.	Izq.	Der.	Izq.
Alcance máximo	m	67.50	67.5	1.35	1.35
Altura máxima	m	8.78	8.18	0.18	0.16
Calados de agua					
Carga sobre el vertedero	m	4.50	4.50	0.09	0.09
Carga sobre el perfil	m	2.50	2.50	0.05	0.05
Calado en el cuenco	m	12		0.25	
Cuenco de socavación					
Profundidad de socavación	m	5.11	5.43	0.10	0.11

Tabla No 6.14 Resultados experimentales prueba D_A

6.2.2 PRUEBA D_B (DEFLECTORES ALTERNATIVA D Q=1002.57m³/s)

El comportamiento de los chorros expulsados por los dos vertederos es similar al de la prueba D_A, pero como el caudal disminuye las medidas de las características hidrodinámicas del chorro, calados en los vertederos y en el cuenco también disminuyen.



Fotografía No 6.13 Trayectoria de los chorros prueba D_B

En la tabla No.6.15 se muestran los resultados experimentales obtenidos del modelo.

DESCRIPCIÓN	UNIDADES	PROTOTIPO		MODELO	
PRUEBA D _B					
Chorro de descarga vertedero		Der.	Izq.	Der.	Izq.
Alcance máximo	m	63.50	63.50	1.27	1.27
Altura máxima	m	7.08	7.78	0.14	0.16
Calados de agua					
Carga sobre el vertedero	m	4.50	4.50	0.09	0.09
Carga sobre el perfil	m	2.25	2.15	0.045	0.043
Calado en el cuenco	m	11.5		0.23	
Cuenco de socavación					
Profundidad de socavación	m	6.09	6.79	0.12	0.14

Tabla No 6.15 Resultados experimentales prueba D_B

6.2.3 PRUEBA D_C (DEFLECTORES ALTERNATIVA D Q=701.32m³/s)



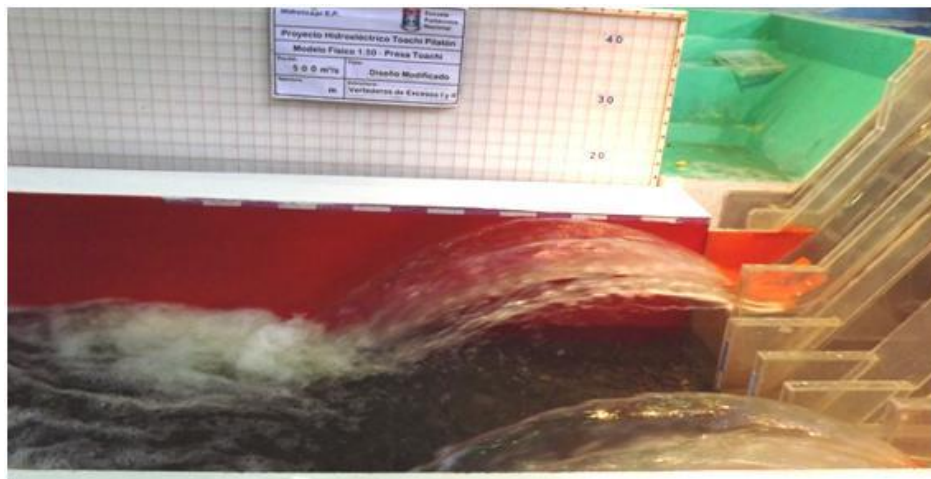
Fotografía No 6.14 Trayectoria de los chorros prueba D_C

En la tabla No.6.16 se muestran los resultados experimentales obtenidos del modelo.

DESCRIPCIÓN	UNIDADES	PROTOTIPO		MODELO	
PRUEBA D _C					
Chorro de descarga vertedero		Der.	Izq.	Der.	Izq.
Alcance máximo	m	62.0	61.0	1.27	1.27
Altura máxima	m	6.78	7.33	0.16	0.14
Calados de agua					
Carga sobre el vertedero	m	4.50	4.50	0.09	0.09
Carga sobre el perfil	m	2.25	2.15	0.045	0.043
Calado en el cuenco	m	11.5		0.23	
Cuenco de socavación					
Profundidad de socavación	m	6.09	6.79	0.12	0.14

Tabla No 6.16 Resultados experimentales prueba D_C

6.2.4 PRUEBA D_D (DEFLECTORES ALTERNATIVA D Q=499.57m³/s)



Fotografía No 6.15 Trayectoria de los chorros prueba D_D

En la tabla No.6.17 se muestran los resultados experimentales obtenidos del modelo.

DESCRIPCIÓN	UNIDADES	PROTOTIPO		MODELO	
PRUEBA D _D					
Chorro de descarga vertedero		Der.	Izq.	Der.	Izq.
Alcance máximo	m	57.30	56.75	1.146	1.135
Altura máxima	m	5.18	6.98	0.104	0.139
Calados de agua					
Carga sobre el vertedero	m	2.90	3.20	0.058	0.064
Carga sobre el perfil	m	0.85	1.05	0.017	0.021
Calado en el cuenco	m	7.60		0.152	
Cuenco de socavación					
Profundidad de socavación	m	5.75	6.84	0.12	0.14

Tabla No 6.17 Resultados experimentales prueba D_D

6.2.5 PRUEBA D_E (DEFLECTORES ALTERNATIVA D Q=197.89m³/s)



Fotografía No 6.16. Trayectoria de los chorros prueba D_E

En la tabla No.6.18 se muestran los resultados experimentales obtenidos del modelo.

DESCRIPCIÓN	UNIDADES	PROTOTIPO	MODELO		
PRUEBA D _E					
Chorro de descarga vertedero		Der.	Izq.	Der.	Izq.
Alcance máximo	m	44.0	45.0	0.88	0.90
Altura máxima	m	3.73	4.68	0.075	0.094
Calados de agua					
Carga sobre el vertedero	m	1.55	1.50	0.031	0.030
Carga sobre el perfil	m	0.45	0.55	0.009	0.011
Calado en el cuenco	m	5.0		0.10	
Cuenco de socavación					
Profundidad de socavación	m	6.73	3.73	0.13	0.07

Tabla No 6.18 Resultados experimentales prueba D_E

6.3 ANÁLISIS DEL CHORRO A LA SALIDA DEL ESQUÍ DE LAS DIFERENTES ALTERNATIVAS DEL GRUPO I

Como se puede observar los resultados expuestos anteriormente en las pruebas del Grupo I varían ya que cada alternativa tiene diferentes características geométricas como radio de curvatura y ángulos de salida tanto de los deflectores como del cucharón de los vertederos de excesos. Es por esto que el análisis del chorro a la salida del esquí es de suma importancia y solamente por pruebas en modelo hidráulico sabremos el funcionamiento hidráulico de las estructuras implantadas.

En las tablas No.6.19 y No.6.20 se muestran los resultados de los alcances y alturas máximas de cada una de las alternativas del Grupo del plan de pruebas para caudales de 400 y 600 m³/s respectivamente.

PRUEBA	CAUDAL	ALCANCE	ALTURA
	m ³ /s	m	m
O ₁	398.04	66.0	6.83
A ₁	397.00	66.5	11.58
B ₁	403.30	69.0	8.08
C ₁	402.77	69.0	7.33
D ₁	395.90	67.0	8.08

Tabla No 6.19 Resultados experimentales Q400m³/s

PRUEBA	CAUDAL	ALCANCE	ALTURA
	m ³ /s	m	m
O ₂	594.70	67.75	7.48
A ₂	605.45	69.00	10.33
A1 ₂	606.10	59.00	1.58
B ₂	606.12	70.50	10.58
C2	600.77	70.50	9.58
D2	598.77	71.25	7.83

Tabla No 6.20 Resultados experimentales Q600m³/s

6.3.1 CHORRO A LA SALIDA DE LOS DEFLECTORES DEL DISEÑO ORIGINAL

En la fotografía No 6.17 se observa el comportamiento del chorro de descarga producido por los deflectores del diseño original cuyas dimensiones se indican en el numeral 4.1.1.2.1.



Fotografía No 6.17 Comportamiento del chorro de descarga con el diseño original

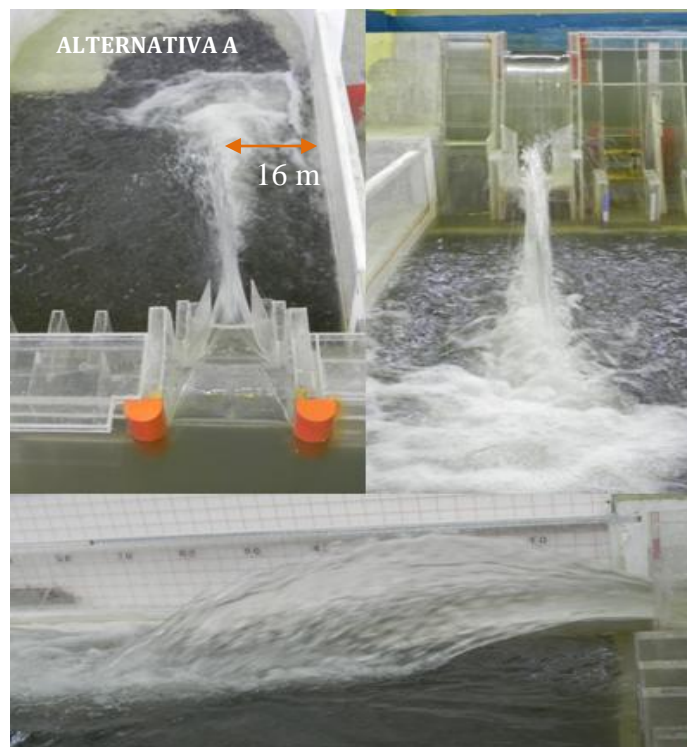
Se tiene un chorro totalmente turbulento incluso para el caudal más pequeño. La red de flujo supercrítico al final de la rápida es totalmente satisfactoria, los deflectores ubicados en la parte inferior rompen el flujo compacto de aproximación permitiendo que gran parte

del área de agua entre en contacto con el aire ayudando de esta manera la disipación de energía , su alcance y altura máxima para un caudal 400 m³/s registrada en la tabla No.6.19 es de 66.0m y 6.83m respectivamente, mientras que para un caudal de 600 m³/s tanto el alcance como altura aumentan a 67.75m y 7.48m registrados en la tabla No.6.20. Estos chorros impactan dentro de la longitud del cuenco de disipación cuya erosión en el material pétreo tiene sus profundidades máximas de 11.7m para 400 m³/s y 10.2 m para 600 m³/s.

Como se puede observar en la fotografía No.6.17 el chorro mantiene su trayectoria recta pero en su parte superior se ensancha en aproximadamente 3.0m a cada lado dejando una separación aproximada con el talud derecho del cuenco de disipación de 8.45m. Por lo tanto el chorro no impacta el talud derecho pero la socavación que produce el mismo afectaría la estabilidad del talud.

6.3.2 CHORRO A LA SALIDA DE LOS DEFLECTORES DE LA ALTERNATIVA A

En la fotografía No 6.18 se observa el comportamiento del chorro de descarga producido por los deflectores de la alternativa A cuyas dimensiones se indican en el numeral 4.2.1

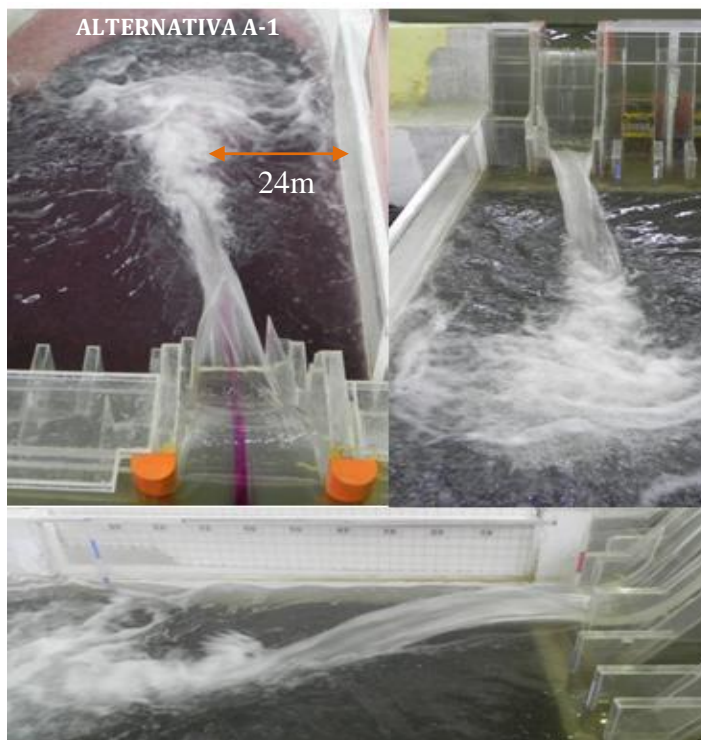


Fotografía No 6.18 Comportamiento del chorro de descarga con la Alternativa A

Para la alternativa A se observa que el chorro es totalmente turbulento cuya red del flujo en cucharón es totalmente supercrítica, el chorro se desprende del labio inferior del cucharón sin ningún problema e inmediatamente se inicia el proceso de difusión de la masa de aire llegando a un alcance máximo de 66.5m y 69.0m y sus alturas de 11.58m y 10.33m, para caudales de 400 y 600 m³/s como se observa en las tablas No.6.19 y No.6.20 respectivamente, siendo estos valores mayores a los obtenidos con el diseño original en 0.75% y 1.88% en alcances y en 69.54% y 38.10% en altura, debido a que las velocidades de despegue son más altas producto del estrechamiento del esquí por las contracciones laterales. La forma del chorro es laminar en trayectoria recta al eje del vertedero de tal forma que se separa del talud derecho del cuenco de disipación en aproximadamente 16.0m, pero debido a que no existe una estructura que disipe la energía al final del esquí como en el diseño original el efecto de socavación es mayor con el caudal de 600 m³/s en un 30.3 % afectando de manera directa al talud derecho.

6.3.3 CHORRO A LA SALIDA DEL DEFLECTOR DE LA ALTERNATIVA A-1

En la fotografía No 6.19 se observa el comportamiento del chorro de descarga producido por los deflectores de la alternativa A-1 cuyas dimensiones se indican en el numeral 4.2.2



Fotografía No 6.19 Comportamiento del chorro de descarga con la Alternativa A1

Para la alternativa A1 se observa que el chorro es totalmente turbulento el despegue se produce solo con una contracción lateral produciendo que el ancho del esquí a la salida aumente en comparación con la anterior alternativa, su alcance máximo es de 59.0 m y su altura de 1.58m como se observa en la tabla No.6.19disminuyendo del diseño original en 14.83%. La forma de chorro tiende a irse con una desviación hacia el centro de cuenco dissipador recomendado a una distancia aproximada de 24.0 m con respecto al talud lateral derecho, pero la erosión que causa en el material granular suelto es 29.90% mayor que la del diseño original puesto que la energía contenida en el agua no es dissipada a la salida de los vertederos.

6.3.4 CHORRO A LA SALIDA DE LOS DEFLECTORES DE LA ALTERNATIVA B

En la fotografía No 6.20 se observa el comportamiento del chorro de descarga producido por los deflectores de la alternativa B cuyas dimensiones se indican en el numeral 4.2.3



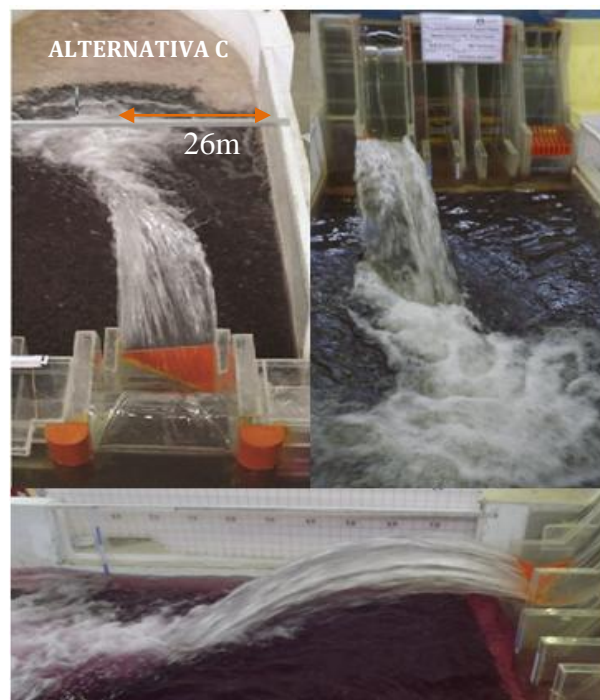
Fotografía No 6.20 Comportamiento del chorro de descarga con la Alternativa B

Para la alternativa B se observa que en cada uno de los deflectores se produce un chorro completamente turbulento y que se desprenden sin ningún problema del labio de cada deflector, los alcances y alturas de los tres deflectores varían ya que tienen diferentes

ángulos de salida, el deflector izquierdo es el de mayor alcance con 69.0 m y 70.50m y la altura máxima se presenta en el deflector derecho con 8.08m y 10.58 m para 400 y 600 m³/s respectivamente. Su variación con respecto al diseño original en alcance es mayor en el 4.54% y 4.05% y en alturas del 18.3% y 41.4%. El chorro se inclina hacia el centro del cuenco de disipación de tal forma que no se produce impacto con el talud derecho del mismo, la distancia desde el talud lateral derecho hacia el punto de impacto del chorro es aproximadamente 12 m, la erosión causada en el cuenco de disipación es excelente ya que es menor que la del diseño original en un 11.42% para 400m³/s y mayor en un 11.96% para 600m³/s de caudal.

6.3.5 CHORRO A LA SALIDA DEL DEFLECTOR DE LA ALTERNATIVA C

En la fotografía No 6.21 se observa el comportamiento del chorro de descarga producido por el deflector de la alternativa C cuyas dimensiones se indican en el numeral 4.2.4



Fotografía No 6.21 Comportamiento del chorro de descarga con la Alternativa C

Para la alternativa C se observa que el chorro tiene una tendencia considerable hacia el centro del cuenco amortiguador con una distancia aproximada de 26.0 m con respecto al talud derecho del cuenco disipador mayor que las alternativas anteriores debido a que la geometría peraltada y curva del deflector logra desviar su chorro sin que este impacte con el talud lateral derecho donde la geología del sitio es mala. Su alcance máximo para

caudales de 400 y 600m³/s es de 69.0 m y 70.5 m, respectivamente y su altura de 7.33 m y 9.58m como se observa en las tablas No.6.19 y No.6.20, variando en 4.55% y 4.06% mayor a los alcances obtenidos con el diseño original y en un 7.32% y 28.07% mayor que las alturas obtenidas del diseño original. El efecto del impacto del chorro produce una socavación menor que el diseño original en un 8.23% para un caudal de 400m³/s y para 600m³/s produce una socavación mayor a la del diseño original en un 18.92%.

6.3.6 CHORRO A LA SALIDA DE LOS DEFLECTORES DE LA ALTERNATIVA D

En la fotografía No 6.22 se observa el comportamiento del chorro de descarga producido por los deflectores de la alternativa D cuyas dimensiones se indican en el numeral 4.2.5



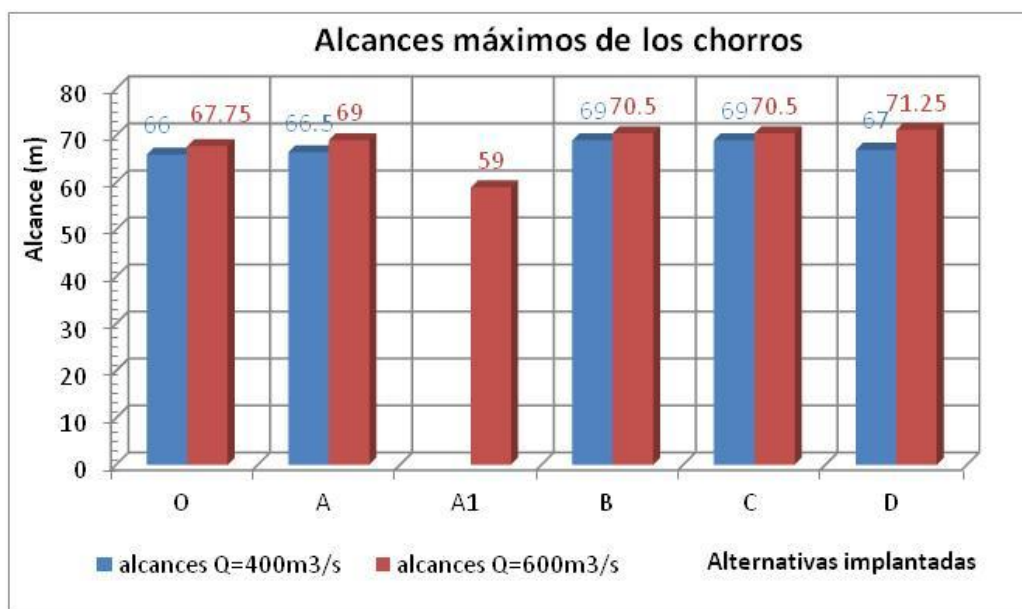
Fotografía No 6.22 Comportamiento del chorro de descarga con la Alternativa D

Para la alternativa D se observa que el chorro mantiene una dirección recta ensanchándose en su parte superior en forma de abanico debido a la forma trapezoidal de los deflectores, el despegue del chorro se produce sin ningún problema tanto del labio de los deflectores como del esquí, la trayectoria del chorro parabólico tiene un alcance hasta el punto de impacto de 67.0 m y 71.25m los cuales se encuentran dentro de la longitud del cuenco disipador, sus alturas son de 8.08m y de 7.03m para caudales de 400m³/s y 600m³/s

respectivamente, variando en 1.51% y 5.17% mayor en cuanto a los alcances del chorro del diseño original y en un 18.30% y 4.68% en cuanto a sus alturas.

En las pruebas realizadas en esta investigación se ha podido comprobar que la conformación del chorro de descarga está íntimamente relacionada con la geometría de los deflectores de cada una de las alternativas.

Analizando directamente los datos obtenidos en las pruebas podemos obtener resultados cualitativos de las diferencias que presenta el chorro de despegue según las modificaciones que se realizaron en los deflectores del esquí. A continuación en la gráfica No.6.1 se presenta la comparación de los alcances máximos medidos para los caudales de 400 y 600 m³/s de cada una de las alternativas que comprenden el grupo I del plan de pruebas.

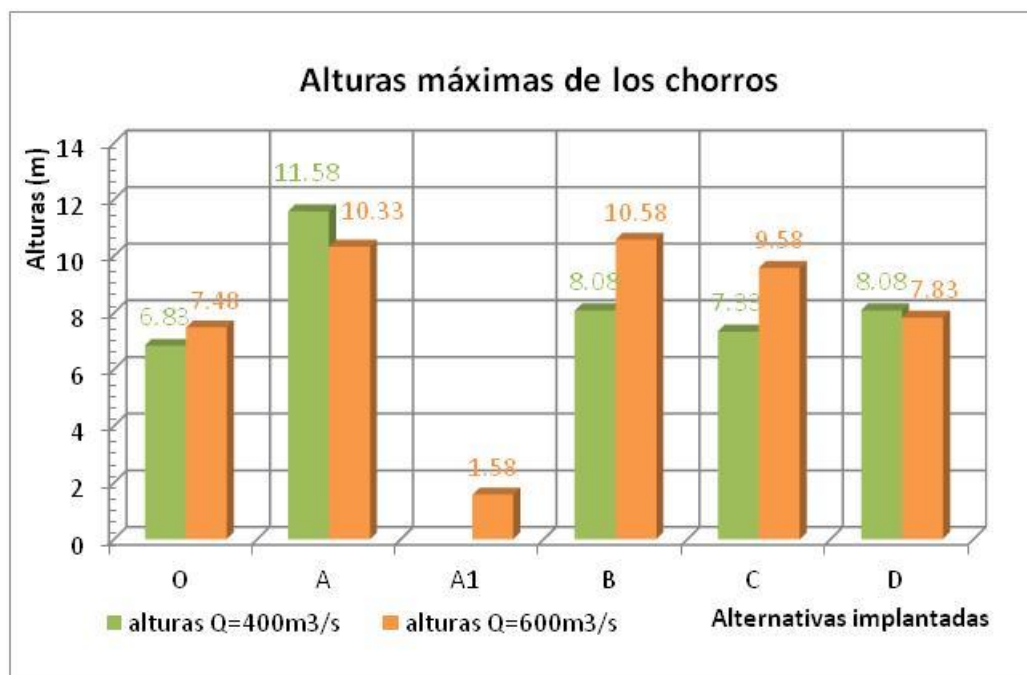


Gráfica No 6.1 Comparación de los alcances máximos de los chorros para el Grupo I del plan de pruebas

En la gráfica No.6.1 podemos observar que los alcances de los chorros de descarga de cada alternativa aumentan a medida que aumenta el caudal de ensayo. De igual forma se observa que el mayor alcance del chorro de descarga se produce para las alternativas B y C tanto para 400 y 600 m³/s, esto debido a las características geométricas de sus deflectores como son sus ángulos de salida. El menor alcance del chorro de descarga es el de la alternativa A-1 que se realizó con un caudal de 600 m³/s, esto debido a que el chorro se interrumpe por la contracción lateral derecha a la salida del esquí y a su vez porque el ángulo de salida del esquí es menor que el ángulo de salida de los deflectores de las demás

alternativas. Todos los chorros de descarga de cada una de las alternativas se desarrollan dentro de la longitud del cuenco de disipación recomendado que es de 105.0m por lo tanto estos no afectaran aguas abajo del cuenco de disipación.

De igual manera en la gráfica No.6.2 se presenta la comparación de las alturas máximas medidas para los caudales de 400 y 600 m³/s de cada una de las alternativas que comprenden el grupo I del plan de pruebas.



Gráfica No 6.2 Comparación de las alturas máximas de los chorros para el Grupo I del plan de pruebas

En esta gráfica se observa que para el diseño original, la alternativa B y C, las alturas aumentan a medida que el caudal aumenta, mientras que las alternativas A y D, las alturas disminuyen a medida que el caudal aumenta. Todas las alturas de los chorros de descarga de las diferentes alternativas son mayores que las alturas obtenidas con el diseño original. El chorro de la alternativa A es el que presenta la mayor altura debido a la influencia de las paredes convergentes a la salida del esquí que produce que el calado en el esquí aumente.

6.4 ANÁLISIS DEL CHORRO A LA SÁLIDA DEL ESQUÍ DE LAS PRUEBAS DEL GRUPO II

En esta fase al cuenco amortiguador se le reduce el ancho, quedando con las dimensiones del diseño original ya que debido a las malas condiciones geológicas de las márgenes del

rio no se puede incrementar de acuerdo a las dimensiones recomendadas. La forma de operar estas pruebas están descritas en el numeral 5.1.2 plan de pruebas del Grupo II. A continuación se analiza la conformación de los chorros derecho e izquierdo como alcances máximos y alturas generados por los deflectores de la alternativa D que son dos deflectores de forma trapezoidal y una pared de contracción en cada vertedero. En las tablas No.6.21 se muestran los resultados de los alcances y alturas máximas de cada una de las pruebas establecidas para el Grupo II.

PRUEBA	CAUDAL m ³ /s	VERTEDERO DERECHO		VERTEDERO IZQUIERDO	
		ALCANCE m	ALTURA m	ALCANCE m	ALTURA m
DA	1203.12	67.50	8.78	67.50	8.18
D _B	1002.57	63.50	7.08	63.50	7.78
D _C	701.32	62.00	6.78	61.0	7.33
D _D	499.57	57.30	5.18	56.75	6.98
D _E	197.89	44.00	3.73	45.00	4.68

Tabla No 6.21 Resultados experimentales de las pruebas del Grupo II

6.4.1 CHORROS PRUEBA D_A (Q=1203.12 m³/s)

En la fotografía No 6.23 se observa el comportamiento de los chorros de descarga producidos por los deflectores de la alternativa D implantados en los dos vertederos de excesos cuyas dimensiones se indican en el numeral 4.2.5



Fotografía No 6.23 Comportamiento de los chorros de la prueba D_A

Se observa que los chorros de descarga se desprenden sin ningún problema tanto del labio del esquí como de los deflectores, la trayectoria de ambos chorros es parabólica siguiendo la dirección del eje de cada vertedero, los alcances máximos derecho e izquierdo son de 67.50m los cuales se encuentran dentro de la longitud del cuenco el mismo que está delimitado por el umbral, mientras que las alturas son de 8.78m para el chorro derecho y 8.18m para el chorro izquierdo. El impacto del chorro se produce cerca de los taludes derecho e izquierdo del cuenco de disipación de energía del tal forma que el efecto de socavación afectará a la estabilidad de los mismos. Como se puede observar en la tabla No.6.21 tanto los alcances como las alturas de los chorros de descarga descienden a medida que el caudal disminuye.

6.4.2 CHORROS PRUEBA D_B (Q=1002.57 m³/s)

En la fotografía No.6.24 se observa el comportamiento de los chorros de descarga de los vertederos de excesos derecho e izquierdo.



Fotografía No 6.24 Comportamiento de los chorros de la prueba D_B

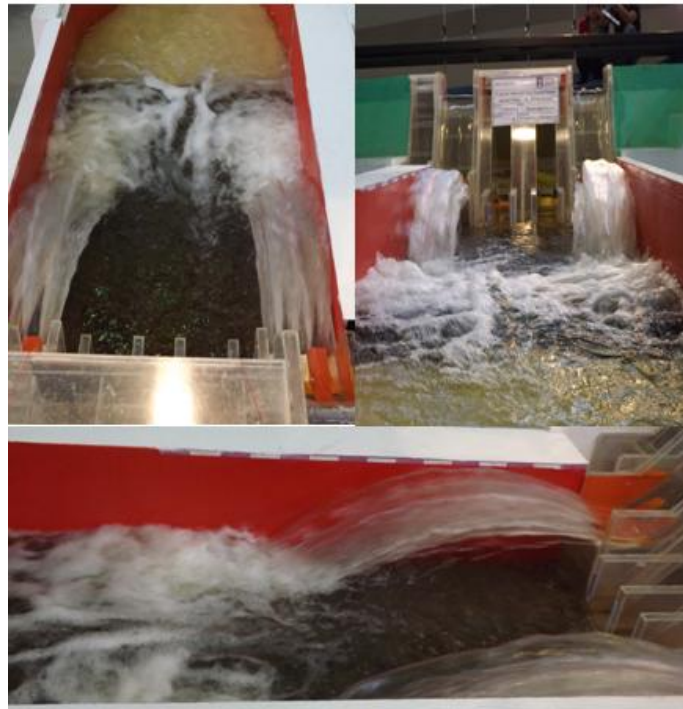
Los alcances máximos del chorro de descarga derecho e izquierdo son de 63.50m los cuales se encuentran dentro de la longitud del cuenco de disipación siendo menor en 6.25% con respecto a los alcances de la prueba anterior, sus alturas son de 7.08m para el derecho 7.78m para el izquierdo presentando variaciones de 24.01% y 5.14% para el chorro derecho e izquierdo respectivamente. El impacto del chorro se produce cerca de los taludes

derecho e izquierdo del cuenco de disipación de energía del tal forma que el efecto de socavación afectará a la estabilidad de los mismos.

6.4.3 CHORROS PRUEBA D_C (Q=701.32 m³/s)

En la fotografía No.6.25 se observa el comportamiento de los chorros de descarga de los vertederos de excesos derecho e izquierdo operados con un caudal de 701.32 m³/s.

Los alcances máximos son de 62.0m para el chorro de descarga derecho y de 61.0m para el chorro de descarga izquierdo, disminuyendo en 2.41% y 4.09% con los resultados de la anterior prueba. De igual forma las alturas que presenta cada chorro derecho e izquierdo son de 6.78m y 7.33m respectivamente, disminuyendo en un 4.42% y 6.14% con respecto a los resultados anteriores.



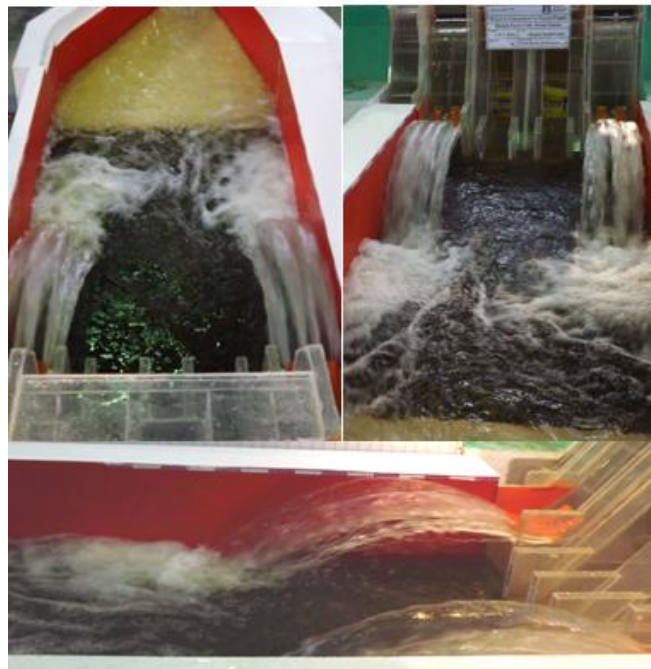
Fotografía No 6.25 Comportamiento de los chorros de la prueba D_C

Como se observa en la fotografía no existe ninguna variación en la dirección de los chorros de descarga por lo tanto los taludes del cuenco están sometidos a grandes vibraciones producto de las socavaciones en el material pétreo que de una u otra forma afectará la estabilidad de los taludes.

6.4.4 CHORROS PRUEBA D_D (Q=499.57 m³/s)

En la fotografía No.6.26 se observa el comportamiento de los chorros de descarga de los vertederos de excesos derecho e izquierdo operados con un caudal de 499.57 m³/s.

Los chorros de descarga derecho e izquierdo impactan cerca de las márgenes del cuenco de disipación impidiendo que las fosas de socavación se desarrollen completamente. Los alcances máximos son de 57.3m para el chorro de descarga derecho y de 56.75m para el chorro de descarga izquierdo, disminuyendo en 8.20% y 7.49% con los resultados de la anterior prueba. De igual forma las alturas que presenta cada chorro derecho e izquierdo son de 5.18m y 6.98m respectivamente, disminuyendo en un 30.88% y 5.01% con respecto a los resultados anteriores.



Fotografía No 6.26 Comportamiento de los chorros de la prueba D_D

6.4.5 CHORROS PRUEBA D_E (Q=197.89 m³/s)

En la fotografía No.6.27 se observa el comportamiento de los chorros de descarga de los vertederos de excesos derecho e izquierdo operados con un caudal de 197.89 m³/s.



Fotografía No 6.27 Comportamiento de los chorros de la prueba D_E

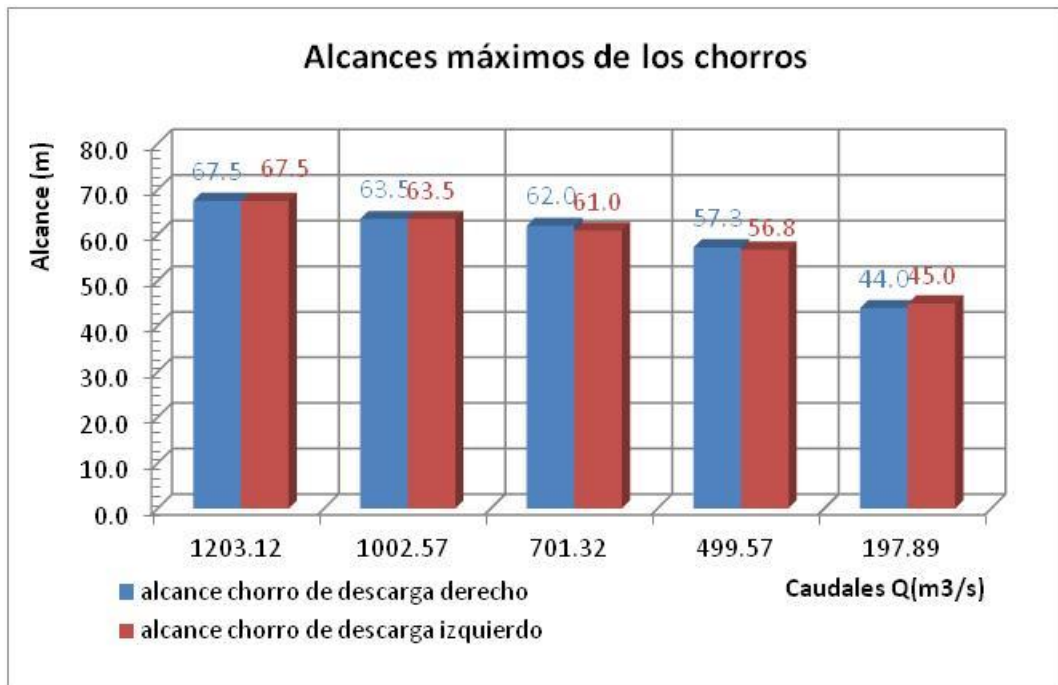
Se observa que a pesar del ser el caudal más bajo el flujo es totalmente turbulento a la salida de los vertederos existiendo un despegue de los chorros sin ningún problema tanto del esquí como del deflector. Los chorros de descarga derecho e izquierdo también impactan cerca de las márgenes del cuenco de disipación impidiendo que las fosas de socavación se desarrollen completamente. Los alcances máximos son de 44.0m para el chorro de descarga derecho y de 45.0m para el chorro de descarga izquierdo, disminuyendo en 30.23% y 26.11% con los resultados de la anterior prueba. De igual forma las alturas que presenta cada chorro derecho e izquierdo son de 3.73m y 4.68m respectivamente, disminuyendo en un 38.87% y 49.15% con respecto a los resultados anteriores.

En las pruebas realizadas para el Grupo II del plan de pruebas se ha podido comprobar que las características hidrodinámicas de los chorros de descarga como alcance y altura están relacionadas directamente con el caudal de ingreso y este a su vez con los calados de agua en rápida y en el esquí de los vertederos de excesos, puesto que a medida que disminuye el caudal los alcances y alturas de los chorros de descarga también disminuyen.

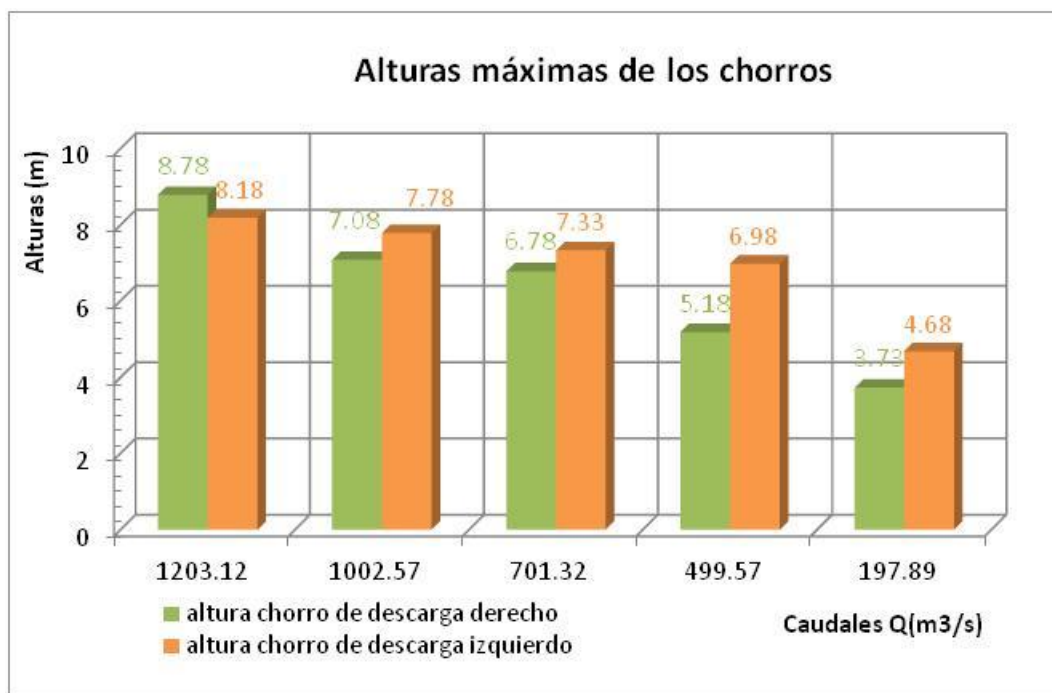
A continuación en las gráficas No.6.3 y No.6.4 se presentan la comparación entre los alcances máximos de cada uno de los chorros de descarga medidos experimentalmente con cada uno de los caudales ensayados y la comparación entre las alturas máxima.

Se puede observar que los máximos alcances y alturas de los chorros se presentan para el caudal de ensayo de $1200\text{m}^3/\text{s}$ el mismo que representa el caudal de máxima crecida en el sitio de la presa Toachi, por lo tanto a pesar de ser el caso más crítico el chorro impacta dentro de la longitud del cuenco de dissipación, a medida que el caudal de ingreso disminuye los alcances y las alturas también disminuyen como se observan en las gráficas No.6.3 y No.6.4.

Se pudo observar que mientras el caudal es menor las variaciones en los resultados del chorro derecho e izquierdo se incrementaban obteniendo valores mayores para el chorro izquierdo puesto que el flujo de aproximación no es semejante en los dos vertederos debido a la forma del embalse.



Gráfica No 6.3 Comparación de las alturas máximas de los chorros para el Grupo II del plan de pruebas



Gráfica No 6.4 Comparación de las alturas máximas de los chorros para el Grupo II del plan de pruebas

6.5 ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES

Los chorros a la salida de las estructuras de descarga de la presa Toachi se analizan mediante la determinación teórica de los alcances para lo cual usamos las ecuaciones planteadas por los investigadores que se mencionan en la literatura técnica presente en el capítulo II las cuales se resumen a continuación, los mismos que serán comparados con los resultados experimentales.

AUTOR	ECUACIÓN	
-Vischer y Hager:	$\frac{L_t}{H_j} = 2\text{sen}\alpha_j \cos\alpha_j \left[1 + \left(1 + (z_i/H_j \text{sen}^2\alpha_j) \right)^{1/2} \right]$	(2.8)
-Elevatorsky:	$X = 1.9(h)\text{sen}2\theta$	(2.12)
-Kawakami:	$L_0 = (V_o^2/g)\text{sen}2\theta$	(2.14)
-USA. Corps of Engineers:	$X/H_v = \text{sen}2\theta + 2\cos\theta \sqrt{(\text{sen}^2\theta + (Y/H_v))}$	(2.15)
-Hidrotoapi: (Ec.Parabólica)	$z = \tan\delta x - (g x^2 / 2v^2 \cos^2\delta)$	(2.16)

En la actualidad no existe ningún método analítico que permita deducir con exactitud el valor de los alcances máximos de los chorros de descarga puesto que son ecuaciones empíricas las cuales nos dan resultados aproximados.

6.5.1 ALCANCES Y ALTURAS TEÓRICOS DE LAS PRUEBAS DEL GRUPO I

La determinación numérica de los alcances se hace de manera separada debido a que las ecuaciones propuestas por los investigadores analizan el alcance del chorro considerando un ángulo de salida a la vez, por esta razón se calculó dos alcances uno producido por los deflectores de las alternativas y otro por los esquís de las mismas.

En la tabla No.6.22 se presenta los alcances calculados para los deflectores y para los esquís de todas las pruebas realizadas en el grupo I del plan de pruebas utilizando caudales de 400 y 600 m³/s.

RESULTADOS ALCANCES TEÓRICOS										
VERTEDERO DE EXCESOS DERECHO										
PRUEBA	CARGA (m)	CAUDAL (m ³ /s)	ÁNGULO θ(°)		V (m/s)	ALCANCES TEÓRICOS (m)				
						Ec 2.8	Ec 2.12	Ec 2.14	Ec 2.15	Ec 2.16
O1	3.90	398.0	esquí	12.0	25.40	45	25	28	52	59
			deflector	37.0	24.87	72	59	61	72	76
A1	3.90	397.0	esquí	12.0	25.40	45	25	27	51	59
B1	3.85	403.0	def. der.	39.4	24.01	71	55	44	68	72
			def. cen.	36.4	24.60	71	56	59	70	75
			def. izq.	23.2	25.10	69	45	48	64	70
C1	4.00	402.8	deflector	37.0	25.12	73	59	62	73	78
D1	3.75	395.6	esquí	20.0	25.40	56	40	42	61	68
			deflector	37.0	24.80	71	57	60	71	76
O2	4.95	595.0	esquí	12.0	25.80	46	26	29	53	60
			deflector	37.0	25.30	74	60	63	74	78
A2	5.10	605.5	esquí	12.0	25.90	46	26	28	53	60
A12	5.35	606.1	esquí	12.0	26.00	47	27	28	53	61
B2	5.25	606.1	def. der.	39.4	24.60	74	57	46	71	75
			def. cen.	36.5	25.20	74	59	62	73	78
			def. izq.	23.2	25.61	71	47	50	66	73
C2	5.00	600.8	deflector	37.0	25.51	75	61	65	75	80
D2	4.75	598.8	esquí	20.0	25.80	57	41	43	63	69
			deflector	37.0	25.16	73	59	63	73	78

Tabla No 6.22 Alcances teóricos de las pruebas del Grupo I

Como podemos observar en los resultados teóricos también se cumple que, cuando el caudal de ingreso aumenta los valores de los alcances de los chorros también. Pese a que la velocidad con la que despega el chorro en los esquís es mayor que la velocidad con la que despega el chorro en los deflectores se presentan en estos los mayores alcances ya que sus ángulos de salida en el labio de los mismos con respecto a la horizontal son relativamente mayores a los ángulos de salida en el labio de los esquís.

Cada ecuación teórica presenta diferentes resultados de los alcances ya que cada autor utilizó parámetros diferentes para la deducción como es la Ec.2.12 (Elevatorsky) el cual incluye un porcentaje de la resistencia del aire en el chorro proyectado. En la siguiente tabla No.6.23 realizamos la comparación de los alcances máximos experimentales con los alcances máximos teóricos de cada una de las ecuaciones obteniendo su diferencia porcentual de tal forma de saber cuál de estas se acerca más a los resultados experimentales.

COMPARACIÓN ENTRE ALCANCES MÁXIMOS EXPERIMENTALES Y TEÓRICOS											
PRUEBA	ALCANCE EXPERIMENTAL (m)	ALCANCES TEÓRICOS (m)									
		Ec 2.8	%	Ec 2.12	%	Ec 2.14	%	Ec 2.15	%	Ec 2.16	%
O1	66.00	72	9.1	59	-10.6	61	-7.6	72	9.1	76	15.2
A1	66.50	45	-32.3	25	-62.4	27	-59.4	51	-23.3	59	-11.3
B1	69.00	71	2.9	56	-18.8	59	-14.5	70	1.4	75	8.7
C1	69.00	73	5.8	59	-14.5	62	-10.1	73	5.8	78	13.0
D1	67.00	71	6.0	57	-14.9	60	-10.4	71	6.0	76	13.4
O2	67.75	74	9.2	60	-11.4	63	-7.0	74	9.2	78	15.1
A2	69.00	46	-33.3	26	-62.3	28	-59.4	53	-23.2	60	-13.0
A12	59.00	47	-20.3	27	-54.2	28	-52.5	53	-10.2	61	3.4
B2	70.50	74	5.0	59	-16.3	62	-12.1	73	3.5	78	10.6
C2	70.50	75	6.4	61	-13.5	65	-7.8	75	6.4	80	13.5
D2	71.25	73	2.5	59	-17.2	63	-11.6	73	2.5	78	9.5

Tabla No 6.23 Comparación de los alcances experimentales con los teóricos del Grupo I

Con la Ec.2.8 que representa la ecuación de Visser Hager se obtiene resultados mayores a los experimentales en la todas las pruebas variando en 9.2% como máximo, excepto para las pruebas A₁, A₂ y A₁₂ en las cuales existe variaciones de hasta el 33.3%, debido a que el ángulo de salida es de 12°, menor que los ángulos de salida de los demás deflectores. Al contrario con la ecuación de Elevatorsky (Ec.2.12) y Kawakami (Ec.2.14), obtenemos resultados menores a los alcances experimentales variando como máximo para la prueba B1 en 18.8% y 14.5% respectivamente. Con las ecuaciones.2.15 y.2.16 que representan a La Corps of Engeeners y trayectoria parabólica respectivamente, obtenemos valores superiores a los experimentales en 9.2% y 15.2% como máximos para las alternativas de las pruebas O, mientras que para las demás pruebas este porcentaje diferencial disminuye.

Para las pruebas O (diseño original) los resultados más cercanos son con la ecuación de Visser Hager y Kawakami, siendo resultados teóricos superiores e inferiores respectivamente a los alcances experimentales como se observa en la tabla No 6.23. Para las pruebas A (contracciones laterales) los resultados teóricos con menor diferencia

porcentual a los resultados experimentales son los obtenidos con la Ec.2.16 que representa la ecuación de la trayectoria parabólica.

Para la prueba A1 (contracción lateral derecha) la Ec. 2.16 es la que arroja el resultado teórico más cercano al experimental en 3.4 % de variación.

Para las pruebas B (deflectores de altura variable) se tiene dos ecuaciones que están bien cercanas de los resultados experimentales que son la Ec.2.8 y la Ec.2.15 las mismas que representan a Visher Hager y la Corps Of Engineers respectivamente, sus valores se observan en la tabla No.6.23.

Para las pruebas C (deflector peraltado) la ecuación que tiene menor desviación porcentual con respecto a los resultados experimentales es la Ec.2.8 que representa la ecuación de Visher Hager.

Para las pruebas D (deflectores trapezoidales y contracción lateral) se puede decir que la ecuación de la Corps of Engineers (Ec.2.15), nos arroja los resultados teóricos más cercanos a los experimentales como podemos observar en la tabla No.6.23.

De igual forma que los alcances, procedemos al cálculo de las alturas máximas de los chorros de descarga pero solo utilizamos la Ec.2.16 la misma que representa la ecuación de la trayectoria parabólica en la siguiente tabla presentamos los resultados teóricos y comparación con los resultados experimentales.

RESULTADOS ALTURAS TEÓRICAS							
VERTEDERO DE EXCESOS DERECHO							
PRUEBA	CARGA (m)	CAUDAL (m³/s)	ÁNGULO $\theta(^{\circ})$	V (m/s)	Altura Ec 2.16	Altura Experimental	% diferencial
O1	3.90	398.0	37.0	24.87	11.42	6.83	67.20
A1	3.90	397.0	12.0	25.40	1.42	11.58	-87.74
B1	3.85	403.0	39.4	24.01	11.93	8.05	48.20
			36.4	24.60	10.91	7.83	39.34
			23.2	25.10	5.29	6.58	-19.60
C1	4.00	402.8	37.0	25.12	11.41	7.83	45.72
D1	3.75	395.6	37.0	24.80	11.31	8.08	39.98
O2	4.95	595.0	37.0	25.30	11.79	7.5	57.20
A2	5.10	605.5	12.0	25.90	1.48	10.35	-85.70
A12	5.35	606.1	12.0	26.00	1.49	1.6	-6.88
B2	5.25	606.1	39.4	24.60	12.51	10.6	18.02
			36.5	25.20	11.4	9.35	21.93
			23.2	25.61	5.52	7.7	-28.31
C2	5.00	600.8	37.0	25.51	11.76	9.58	22.76
D2	4.75	598.8	37.0	25.16	11.69	7.83	49.30

Tabla No 6.24 Comparación de las alturas experimentales con las teóricas del Grupo I

6.5.2 ALCANCES Y ALTURAS TEÓRICOS DE LAS PRUEBAS DEL GRUPO II

En la tabla No.6.25 se presenta los alcances calculados por los deflectores de cada uno de los chorros de descarga derecho e izquierdo de toda la serie de caudales propuestos en el plan de pruebas del grupo II.

RESULTADOS ALCANCES TEÓRICOS									
VERTEDERO DE EXCESOS DERECHO									
PRUEBA	CARGA (m)	CAUDAL (m ³ /s)	ÁNGULO θ (°)	V (m/s)	ALCANCES TEÓRICOS (m)				
					Ec 2.8	Ec 2.12	Ec 2.14	Ec 2.15	Ec 2.16
DA	6.99	1203.12	37	26.05	81.8	63.2	66.5	77.8	81.4
DB	6.13	1002.57	37	25.72	80.0	61.6	64.8	76.1	79.7
DC	4.89	701.32	37	25.24	77.6	59.4	62.4	73.7	77.2
DD	3.89	499.57	37	24.85	75.6	57.5	60.5	71.7	75.1
DE	2.13	197.89	37	24.14	72.0	54.3	57.1	68.2	71.5
VERTEDERO DE EXCESOS IZQUIERDO									
DA	7.00	1203.12	37	26.05	81.8	63.2	66.5	77.8	81.4
DB	6.07	1002.57	37	25.69	79.9	61.5	64.7	76.0	79.5
DC	4.89	701.32	37	25.24	77.6	59.4	62.4	73.7	77.2
DD	3.91	499.57	37	24.86	75.6	57.6	60.5	71.7	75.2
DE	2.10	197.89	37	24.13	72.0	54.3	57.1	68.2	71.4

Tabla No 6.25 Alcances teóricos pruebas del Grupo II

A continuación en la siguiente tabla presentamos la comparación de los resultados teóricos con los resultados experimentales en la cual podemos observar sus porcentajes de variación con respecto a cada ecuación.

COMPARACIÓN ENTRE ALCANCES MÁXIMOS EXPERIMENTALES Y TEÓRICOS											
PRUEBA	ALCANCE EXPERIMENTAL (m)	ALCANCES TEÓRICOS (m)									
		Ec 2.8	%	Ec 2.12	%	Ec 2.13	%	Ec 2.15	%	Ec 2.16	%
VERTEDERO DE EXCESOS DERECHO											
DA	67.50	81.8	21.1	63.2	-6.4	66.5	-1.5	77.8	15.3	81.4	20.6
DB	63.50	80.0	26.1	61.6	-2.9	64.8	2.1	76.1	19.9	79.7	25.5
DC	62.00	77.6	25.1	59.4	-4.2	62.4	0.7	73.7	18.8	77.2	24.5
DD	57.30	75.6	31.9	57.5	0.4	60.5	5.6	71.7	25.1	75.1	31.1
DE	44.00	72.0	63.7	54.3	23.5	57.1	29.8	68.2	55.1	71.5	62.5
VERTEDERO DE EXCESOS IZQUIERDO											
DA	67.50	81.8	21.1	63.2	-6.3	66.5	-1.5	77.8	15.3	81.4	20.6
DB	63.50	79.9	25.9	61.5	-3.1	64.7	1.9	76.0	19.7	79.5	25.2
DC	61.00	77.6	27.1	59.4	-2.7	62.4	2.3	73.7	20.8	77.2	26.6
DD	56.75	75.6	33.2	57.6	1.5	60.5	6.7	71.7	26.4	75.2	32.5
DE	45.00	72.0	59.9	54.3	20.6	57.1	26.8	68.2	51.5	71.4	58.7

Tabla No 6.26 Comparación de los alcances experimentales con los teóricos del Grupo II

Como podemos observar para estas pruebas la Ec.2.12 y la Ec.2.13 que corresponden a Elevatorsky y Kawakami respectivamente, son las que más se aproximan a los resultados

experimentales tanto para el chorro de descarga derecho e izquierdo, existiendo mayor variación para el caudal más bajo que corresponde a la prueba D₅. Para los caudales altos podemos observar que los resultados teóricos tienen porcentajes de diferencia menores con respecto a los valores experimentales mientras que para los caudales bajos estos porcentajes de diferencia aumentan.

En la siguiente tabla No.6.27 presentamos los valores de las alturas teóricas calculados de igual forma que en el anterior grupo de pruebas con la ecuación de la trayectoria parabólica (Ec. 2.16)

RESULTADOS ALCANCES TEÓRICOS							
VERTEDERO DE EXCESOS DERECHO							
PRUEBA	CARGA (m)	CAUDAL (m³/s)	ÁNGULO $\theta(^{\circ})$	V (m/s)	Altura Ec 2.16	Altura Experimental	% diferencial
DA	6.99	1203.12	37	26.05	7.94	8.78	-9.6
DB	6.13	1002.57	37	25.72	7.74	7.08	9.3
DC	4.89	701.32	37	25.24	7.44	6.78	9.7
DD	3.89	499.57	37	24.85	7.20	5.18	39.0
DE	2.13	197.89	37	24.14	6.77	3.73	81.5
VERTEDERO DE EXCESOS IZQUIERDO							
DA	7.00	1203.12	37	26.05	7.95	8.18	-2.8
DB	6.07	1002.57	37	25.69	7.71	7.78	-0.9
DC	4.89	701.32	37	25.24	7.44	7.33	1.5
DD	3.91	499.57	37	24.86	7.21	6.98	3.3
DE	2.10	197.89	37	24.13	6.75	4.68	44.2

Tabla No 6.27 Comparación de las alturas experimentales con las teóricas del Grupo II

Se observa que las mayores alturas de los chorros se las obtiene cuando el caudal de ingreso es mayor, ya que la carga de agua sobre los vertederos también aumenta, los resultados teóricos tienen menor diferencia porcentual para los tres primeros caudales correspondientes a las pruebas D_A, D_B, D_C, mientras que para las pruebas D_D y D_E, este porcentaje aumenta.

6.6 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE LOS VALORES EXPERIMENTALES

El presente análisis se lo realiza con los resultados del plan de pruebas del Grupo II ya que tenemos cinco caudales de prueba con la misma alternativa de deflectores a la salida de los dos vertederos de excesos.

Sobre la base del Análisis Dimensional ejecutado para alcanzar el objetivo del estudio experimental, la verificación cualitativa y relativa de la eficiencia de los deflectores

discontinuos se lleva a cabo mediante la comparación de las características hidrodinámicas del chorro (alcance máximo y altura alcanzada) obtenidas en la investigación experimental con las obtenidas de las ecuaciones teóricas. Las variables del estudio son el alcance y altura experimental de los chorros de descarga de los vertederos de excesos, por lo tanto para obtener la variable adimensional sacaremos el cociente con respecto a los alcances y las alturas de los chorros obtenidos con las ecuaciones teóricas, quedando (Alcance E/Alcance T) y (Altura E/Altura T).

La otra variable adimensional que produce mejor ajuste es el caudal adimensional (Q_{adim}), que se calcula según la ecuación 6.1, donde Q es el caudal a la salida de cada vertedero en (m^3/s), H es la profundidad de agua en el interior del cuenco en (m), B_c es el ancho del cuenco al pie de la presa Toachi en (m), g es la aceleración de la gravedad en (m/s^2) y Δz es la distancia desde el bordo de salida del deflector hasta la superficie de agua sobre la cresta del vertedero en (m).

$$Q_{adim} = \frac{Q}{(H \cdot B_c) \cdot (2 \cdot g \cdot \Delta z)^{0.5}} \quad (6.1)$$

Por lo tanto las relaciones funcionales quedan definidas de la siguiente manera.

$$(Alcance E/Alcance T) = \Phi (Q / (H \cdot B_c \cdot (2 \cdot g \cdot \Delta z)^{0.5}) = \Phi (Q_{adim}) \quad (6.2)$$

$$(Altura E/Altura T) = \Phi (Q / (H \cdot B_c \cdot (2 \cdot g \cdot \Delta z)^{0.5}) = \Phi (Q_{adim}) \quad (6.3)$$

La definición de las magnitudes geométricas y dinámicas utilizadas en las relaciones anteriores, se encuentra en el siguiente esquema de la figura No.6.28 del fenómeno de flujo.

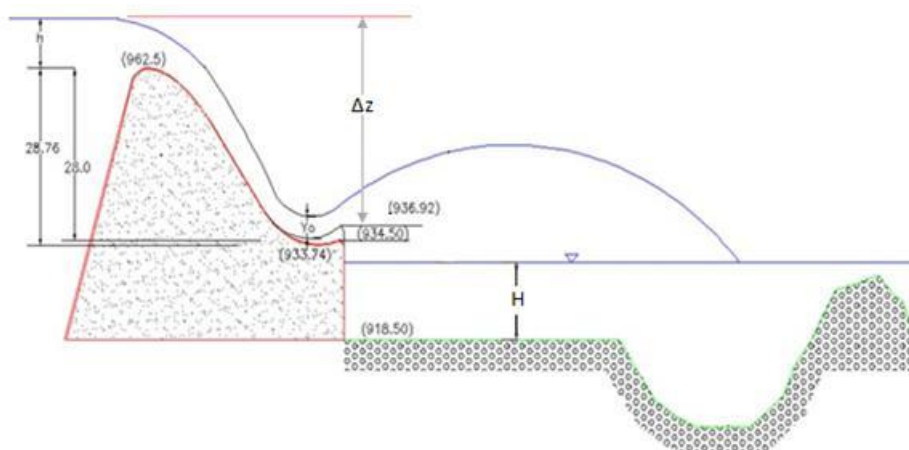
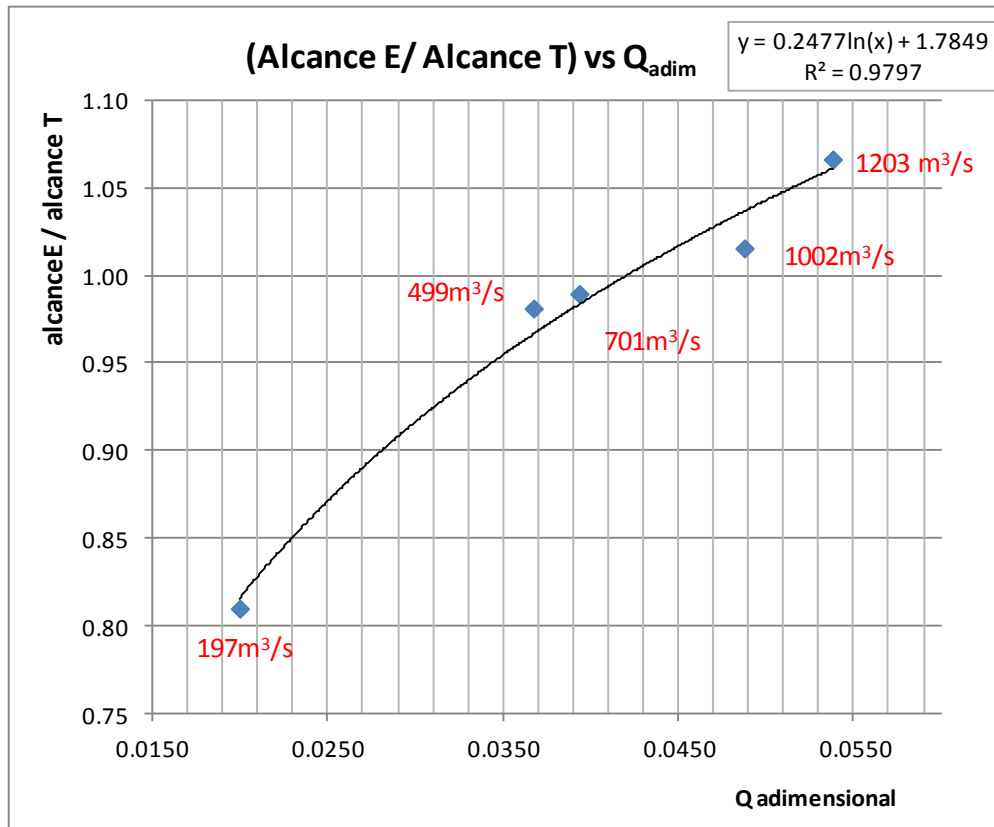


Figura No 6.2 Nomenclatura usada en el procesamiento de datos

En la gráfica No.6.5 se presenta el ajuste con las variables adimensionales en el cual se ubica en el eje de las ordenadas la relación (Alcance E/ Alcance T) y en el eje de las abscisas el Qadimensional, para este gráfico la línea de tendencia que mejor se ajusta es la logarítmica que presenta un coeficiente de determinación R^2 de 0.9797, su ecuación se muestra a continuación.



Gráfica No 6.5 (Alcance Experimental/Alcance Teórico) vs Qadim

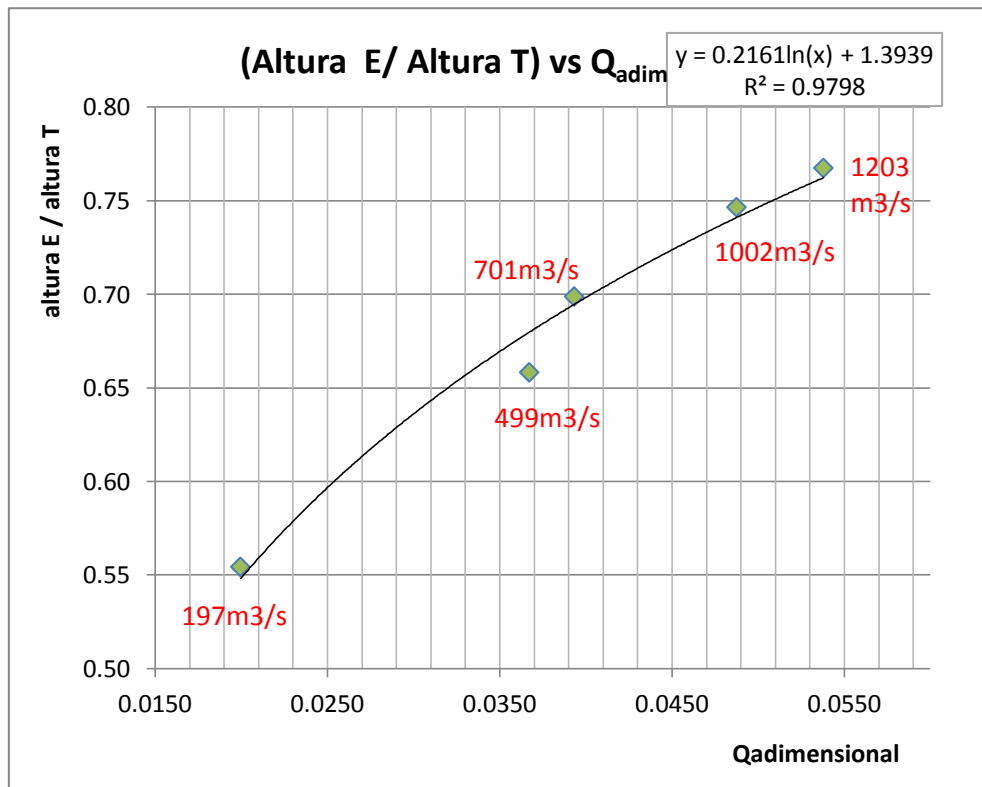
$$y = 0.2477 \ln(x) + 1.7849 \quad (6.4)$$

Sustituyendo las variables adimensionales en la ecuación 6.4 se obtiene la siguiente expresión.

$$\frac{\text{Alcance E}}{\text{Alcance T}} = 0.2477 \ln\left(\frac{Q}{(H * Bc) * (2 * g * \Delta z)^{0.5}}\right) + 1.7849 \quad (6.5)$$

En la gráfica No.6.6 se presenta el ajuste con las variables adimensionales en el cual se ubica en el eje de las ordenadas la relación (Altura E/ Altura T) y en el eje de las abscisas el Qadimensional, para este gráfico de igual forma que la anterior la línea de tendencia que

mejor se ajusta es la logarítmica puesto que presenta un coeficiente de determinación R^2 de 0.9798, su ecuación se muestra a continuación.



Gráfica No 6.6 (Altura Experimental/Altura Teórico) vs Qadim

$$y = 0.2161 \ln(x) + 1.3939 \quad (6.6)$$

Sustituyendo las variables adimensionales en la ecuación 6.6 se obtiene la siguiente expresión.

$$\frac{\text{Altura E}}{\text{Altura T}} = 0.2161 \ln\left(\frac{Q}{(H * Bc) * (2 * g * \Delta z)^{0.5}}\right) + 1.3939 \quad (6.7)$$

El análisis de las relaciones funcionales entre los parámetros adimensionales previamente seleccionados, permite encontrar una tendencia del incremento del caudal vertido: a mayor caudal, el alcance y la altura de los chorros de descarga también son mayores como se observa en las gráficas No.6.5 y No.6.6.

6.7 CONCLUSIONES

Grupo I:

1. Después de realizar un análisis de resultados la mejor alternativa que logra desviar el chorro considerablemente hacia el centro del cuenco amortiguador es la

alternativa C (deflector peraltado), con aproximadamente 26.0 m de separación respecto del talud lateral derecho del cuenco amortiguador recomendado, garantizando que los efectos de socavación y las vibraciones producto del impacto del chorro no afecten la estabilidad del mismo.

2. Todos los chorros de descarga de cada una de las alternativas se desarrollan dentro de la longitud del cuenco de disipación recomendado que es de 105.0m por lo tanto estos no afectarán aguas abajo del cuenco de disipación.
3. Pese a que la velocidad con la que despegas el chorro en los esquís es mayor que la velocidad con la que despegas el chorro en los deflectores se presentan en estos los mayores alcances ya que sus ángulos de salida en el labio de los mismos con respecto a la horizontal son relativamente mayores a los ángulos de salida en el labio de los esquís.
4. Con la Ec.2.8 que representa la ecuación de Visher Hager se obtiene los resultados más cercanos a los experimentales en todas las pruebas variando en 9.2% como máximo, excepto para las pruebas A_1 , A_2 y A_{12} en las cuales existe variaciones de hasta el 33.3%, debido a que el ángulo de salida es 12° , menor a los ángulos de salida de los demás deflectores.

Grupo II:

1. No existe variación alguna en la dirección de los chorros de descarga por lo tanto los taludes laterales del cuenco están sometidos a grandes vibraciones producto del impacto de chorro al pie de los mismos y a su vez el efecto de socavación en el material pétreo afectará la estabilidad de los taludes.
2. Los deflectores tipo trapezoidal ubicados a la salida de los vertederos producen la separación del flujo compacto mejorando la disipación de energía por la desintegración y pulverización del chorro en el aire, pero la formación de las fosas de socavación es interrumpida por los taludes laterales del cuenco amortiguador cuya geología es mala.

3. En estas pruebas se ha podido comprobar que las características hidrodinámicas de los chorros de descarga como alcance y altura están relacionadas directamente con el caudal de ingreso y este a su vez con los calados de agua en la cresta y en el esquí de los vertederos de excesos, puesto que a medida que disminuye el caudal los alcances y alturas de los chorros de descarga también disminuyen.
4. Como podemos observar para estas pruebas la Ec.2.12 y la Ec.2.14 que corresponden a Elevatorsky y Kawakami respectivamente, son las que más se aproximan a los resultados experimentales tanto para el chorro de descarga derecho e izquierdo.
5. Para los caudales altos podemos observar que los resultados teóricos tienen porcentajes de diferencia menores con respecto a los valores experimentales mientras que para los caudales bajos estos porcentajes de diferencia aumentan.

CAPÍTULO VII

7 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 CONCLUSIONES SOBRE EL ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LAS ALTERNATIVAS DE DISEÑO

Plan de pruebas Grupo I:

- El chorro lanzado por los deflectores del diseño original presenta un alcance máximo de 67.75m, este mantiene una trayectoria recta paralela al eje del vertedero, en su parte superior se ensancha en aproximadamente 3.0m a cada lado dejando una separación aproximada de 8.45m con respecto al talud derecho del cuenco de disipación, produciendo que el efecto de socavación afecte la estabilidad de esta margen.
- El chorro lanzado desde el esquí reducido por las contracciones laterales de la alternativa A presenta un alcance máximo de 69.0 m menor en 1.88% al alcance del chorro de diseño original, su forma es laminar con su trayectoria paralela al eje del vertedero logrando una separación de 16.0m respecto al talud lateral derecho, pero debido a que no existe una buena aireación del chorro el efecto de socavación aumenta en un 30.3% a lo obtenido con el diseño original, afectando de igual manera la margen derecha.
- El chorro lanzado de la alternativa A-1 tiene un alcance de 59.0m menor que las demás alternativas ya que el ángulo de salida del esquí es de 12 grados, la desviación del chorro hacia el centro del cuenco de disipación es excelente con aproximadamente 24.0m desde el talud lateral derecho, pero la erosión que causa en el material granular suelto es 29.9% mayor que la del diseño original debido a que la energía contenida en el agua no es disipada a la salida del vertedero.
- Para la alternativa B se producen tres chorros diferentes uno por cada deflector, el que presenta mayor alcance es el deflector izquierdo con 70.5m, cuyo ángulo de salida es de 23.4 grados, y el deflector izquierdo es el que presenta la mayor altura de 10.58m puesto que su ángulo de salida es de 39.4 grados, esta alternativa produce que el chorro se desvíe 12.0m desde la margen lateral derecha hacia el

centro del cuenco disipador, la erosión en el cuenco es mayor a la del diseño original en un 11.96%.

- La alternativa C, que presenta un deflector peraltado es la que mejor logra desviar el chorro hacia el centro del cuenco amortiguador, con aproximadamente 26.0 m de separación respecto del talud lateral derecho del cuenco amortiguador recomendado, garantizando que los efectos de socavación y las vibraciones producto del impacto del chorro no afectan la estabilidad del mismo, su alcance máximo es de 70.5m mayor en 4.06% que el alcance del diseño original, debido a que el impacto del chorro es compacto presenta una socavación mayor a la del diseño original en un 18.92%.
- Para la alternativa D se observa que el chorro mantiene una trayectoria recta ensanchando su parte superior en forma de abanico debido a la forma trapezoidal de los deflectores, la separación aproximada es de 10.5m desde el talud lateral derecho, con un alcance máximo de 71.25m, el impacto del chorro se produce cerca de la margen lateral derecha por lo tanto el chorro de esta alternativa afectará la estabilidad de los taludes.
- Todos los chorros de descarga de cada una de las alternativas se desarrollan dentro de la longitud del cuenco de disipación recomendado que es de 105.0m, asegurando su diseño en lo que respecta a su longitud.
- Con la Ec.2.8 que representa la ecuación de Visser Hager se obtiene los resultados más cercanos a los experimentales en todas las pruebas variando en 9.2% como máximo, excepto para las pruebas A₁, A₂ y A1₂ en las cuales existe variaciones de hasta el 33.3%, debido a que el ángulo de salida es de 12°, menor a los ángulos de salida de los demás deflectores.
- Las variaciones entre los alcances experimentales con los calculados se da puesto que son ecuaciones empíricas en las cuales los autores se basaron en la operación de una sola estructura (cucharón) que proyecta un chorro único sin dividirlo en varios chorros, y en nuestro caso tenemos las alternativas que producen varios chorros.

Plan de pruebas Grupo II:

- El cucharón del salto en esquí conjuntamente con los deflectores trapezoidales dispuestos al final de los vertederos separan el flujo limpiamente proveniente de la rápida en varios chorros, debido a los diferentes ángulos de salida, 20 grados para el caso del cucharón y 37 grados en los deflectores. Se presenta un flujo de excelente calidad en la rápida, no se presentan problemas en el cucharón. Los chorros son lanzados e inmediatamente se inicia el proceso de difusión con la masa de aire con las características del flujo turbulento totalmente desarrollado.
- No existe variación alguna en la dirección de los chorros de descarga por lo tanto los taludes laterales del cuenco están sometidos a grandes vibraciones producto del impacto de chorro al pie de los mismos y a su vez el efecto de socavación en el material pétreo afectará la estabilidad de los taludes.
- Los deflectores tipo trapezoidal ubicados a la salida de los vertederos producen la separación del flujo compacto mejorando la disipación de energía por la desintegración y pulverización del chorro en el aire, pero la formación de las fosas de socavación es interrumpida por los taludes laterales del cuenco amortiguador cuya geología es mala.
- El calado sobre los deflectores llega a 1.9m cuando el caudal es de $600\text{m}^3/\text{s}$ (caudal de diseño de los vertederos), generando velocidades promedio de 26m/s en prototipo, la cual es de carácter erosivo afectando el material del deflector y el cucharón del salto en esquí.
- En estas pruebas se ha podido comprobar que las características hidrodinámicas de los chorros de descarga como alcance y altura están relacionadas directamente con el caudal de ingreso y este a su vez con los calados de agua en la cresta y en el esquí de los vertederos de excesos, puesto que a medida que disminuye el caudal los alcances y alturas de los chorros de descarga también disminuyen.
- Como podemos observar para estas pruebas la Ec.2.12 y la 2.14 que corresponden a Elevatorsky y Kawakami, respectivamente, son las que más se aproximan a los re-

sultados experimentales tanto para el chorro de descarga derecho e izquierdo.

- Para los caudales altos podemos observar que los resultados teóricos tienen porcentajes de diferencia menores con respecto a los valores experimentales mientras que para los caudales bajos estos porcentajes de diferencia aumentan.
- Al realizar los análisis de sensibilidad tanto para los alcances como para las alturas se obtuvo una tendencia creciente de los mismos en relación al caudal obteniendo una función logarítmica en ambos casos cuyos coeficientes de correlación R^2 son muy cercanos a la unidad.

7.2 CONCLUSIONES SOBRE EL PROYECTO DE TITULACIÓN

- Este tipo de investigaciones con modelos físicos ayudan a entender y analizar de mejor manera los fenómenos que se presentan con el flujo en las obras hidráulicas puesto que se observa el comportamiento del mismo de manera tridimensional, y además, permite estudiar alternativas de diseño con el fin de recomendar cual es la opción más favorable para solucionar los problemas encontrados con el diseño original.
- La experiencia adquirida con la modelación física ha permitido ampliar los conocimientos sobre el comportamiento de los fenómenos hidráulicos principalmente en los fenómenos que están gobernados por las fuerzas gravitatorias ya que esta investigación de las alternativas de deflectores utilizados para dirigir el chorro hacia el centro del cuenco de disipación, se fundamenta en la similitud de Froude.
- De los resultados obtenidos en el modelo hidráulico y los encontrados por las diversas fórmulas utilizadas en el cálculo de alcance máximo del chorro, se ha observado que existen diferencias en los resultados debido a que son fórmulas empíricas las cuales nos dan una idea aproximada de lo que puede pasar, por lo cual se hace prescindible la ayuda de modelos hidráulicos no solo para verificar la validez de los diseños en su etapa inicial, sino que son una poderosa herramienta que permite tomar decisiones con respecto al diseño definitivo.
- Dentro de los errores sistemáticos tenemos los efectos no considerados, es así que los modelos hidráulicos de los saltos en esquí no son capaces de reproducir los

fenómenos como aireación, ni la tensión superficial del agua, gravedad o influencia del viento, por lo tanto los chorros lanzados en el modelo no se comportaran idénticos a la realidad, puesto que en prototipo el chorro contiene más aire y la resistencia que este presenta se desarrolla en una longitud mayor que la que se presenta en modelo, obteniendo así menores alcances en prototipo.

7.3 RECOMENDACIONES

- Después de observar que el comportamiento de los chorros de descarga afectan la estabilidad de los taludes laterales del cuenco de disipación y, debido a que no es posible aumentar las dimensiones del cuenco por la existencia de fallas geológicas aguas debajo de la presa Toachi, la mejor recomendación para el diseño será reubicar los vertederos de excesos al centro de la presa logrando de esta manera que los chorros impacten en el centro del cuenco de disipación, para que así las fosas de socavación no afecten a los taludes.
- Se recomienda mantener la geometría de los saltos de esquí y deflectores de la alternativa D, debido a su buen desempeño hidráulico como disipador de energía.
- Que la operación de los vertederos de excesos debe realizarse de forma simultánea para reducir los efectos de socavación, puesto que se comprobó que al operar solo un vertedero la socavación aumentaba.
- Para alcanzar un diseño óptimo de un salto en esquí se debe garantizar que el chorro proyectado cauce el menor efecto aguas abajo de las estructuras para lo cual a más del empleo de las ecuaciones teóricas, se recomienda realizar un modelo físico en el cual podremos probar varios escenarios.
- Que para proyectos de obras hidráulicas importantes se recomienda la realización de modelos físicos ya que de esta manera se puede observar el comportamiento del flujo y los fenómenos hidráulicos, y a su vez, probar varios escenarios con distintas alternativas de diseño de tal forma de dar soluciones a problemas que podrían presentarse en prototipo, ayudando de esta manera a la optimización del diseño.

GLOSARIO DE TÉRMINOS

r_{\min} = radio mínimo del cucharón del salto en esquí.

ρ = densidad del agua.

α_j = ángulo de salida del salto en esquí.

H_o = carga de energía en la aproximación.

g = aceleración de la gravedad.

\bar{q} = valor adimensional.

q = caudal específico o unitario.

z = componente vertical del chorro.

x = componente horizontal del chorro.

V_j = velocidad en la salida del salto en esquí.

H_j = carga de velocidad a la salida de salto en esquí.

h_{\min} = altura mínima de la cresta del esquí.

α = ángulo de trayectoria.

α' = ángulo de impacto o incidencia.

s = pendiente de la rápida.

d_1 = carga en el perfil del vertedero.

h_e = altura de velocidad en el labio del esquí.

x_M = coordenada horizontal de la ubicación máxima del chorro.

y_M = coordenada vertical de la ubicación máxima del chorro.

L_t = longitud de la trayectoria o alcance del chorro.

z_i = altura relativa de impacto a la salida del salto en esquí.

B_j = expansión transversal del chorro.

L_s = longitud del vertedero.

z_b = distancia entre el labio del deflector y la superficie libre en la aproximación.

h = carga hidráulica entre el fondo del cucharón y el nivel aguas arriba del vertedero.

\emptyset = ángulo de salida del deflector.

L_o = alcance del chorro.

V_o = velocidad en la salida del salto en esquí.

L_1 = alcance considerando la resistencia del aire.

X = alcance del chorro.

H_v = carga de velocidad en el labio.

Y = distancia entre el labio y la superficie libre de la descarga.

L_p = longitud en prototipo.

L_m = longitud en modelo.

e_L = escala de longitudes.

V_p = velocidad en prototipo.

V_m = velocidad en modelo.

e_v = escala de velocidades.

T_p = tiempo en prototipo.

T_m = tiempo en modelo.

e_T = escala de tiempos.

λ = coeficiente de pérdida por fricción.

Re = parámetro adimensional de Reynolds.

We = parámetro adimensional de Weber.

R_h = radio hidráulico.

ν = viscosidad cinemática.

Fr_{mod} = Número de Froude en modelo.

Fr_{prot} = Número de Froude prototipo.

BIBLIOGRAFÍA

1. ESTUDIO EN MODELO HIDRÁULICO DE LA PRESA TOACHI Y SUS OBRAS COMPLEMENTARIAS.”Informe técnico fase 1”, EPN.Quito, Noviembre 2011.98p.
2. ESTUDIO EN MODELO HIDRÁULICO DE LA PRESA TOACHI Y SUS OBRAS COMPLEMENTARIAS.”Informe técnico fase 2”, EPN.Quito, Enero 2012.62p.
3. VISCHER, D.L., HAGER, W.H., “Dam hydraulics”.Switzerland.Wiley.1988. 304p.
4. HELLER., Valentin, HAGER William H.,F.ASCE, and HANS-ERWIN Minor.”Ski Jump Hydraulics.” Journal of Hydraulic Engineering, Vol.131, No.5.2005.355p.
5. ELEVATORSKY, E.A.”Hydraulic Energy Dissipators”. New York. McGrawHill 1959.
6. WHITTAKER, J. “Scour related to Energy Dissipators for Head Structures”.Zurich.1984.
7. NOVAK, P. “Developments in Hydraulic Engineering”. New York. Vol 2. 1984.
8. UNITED STATES DEPARTMENT OF THE INTERIOR BUREAU OF RECLAMATION. Diseño de Presas Pequeñas. 1966. México. Continental. 1982. 639p.
9. U.S.A. CORPS OF ENGINEERS. “Hydraulic desing criteria”. Sheet 112.
- 10.HIDALGO, Marcelo. “Introducción a la teoría de los Modelos Hidráulicos y Aplicaciones Básicas”. Departamento de Hidráulica. EPN.Quito. 2007. 62p
- 11.CASTRO, Marco. “Análisis Dimensional y Modelación física en Hidráulica”. EPN. Quito.199p.
12. VELASCO, C., VERA, P.”Estudio en modelo físico de la disipación de energía aguas debajo de los vertederos de excesos y desagües de fondo de la presa Toachi Proyecto Hidroeléctrico Toachi Pilatón”. Tesis de grado. Quito. EPN. Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental.2012.172 p.

13. MOLINA, D., GUEVARA, J. “Análisis experimental de la disipación de energía en cimacios con perfil liso y escalonado”. Tesis de grado. Quito. EPN. Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental. 2010.
14. ARGUELLO. W.”Estudio experimental sobre el chorro de salida y la eficiencia del cuenco amortiguador al pie de un salto en esquí y su aplicación al proyecto Misbaque.”. Tesis de grado. Quito. EPN. Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental.1991. 111p.
15. CELEC HIDROTOAPI, Descripción del proyecto hidroeléctrico Toachi- Pilatón. Quito.2011.
16. CELEC HIDROTOAPI, Informe 6256.0-R18 Presa Toachi – Hidraulica. Memoria de cálculo.Quito.2010.

ANEXOS

ANEXO No.1.- REGISTRO DE DATOS EXPERIMENTALES

PROYECTO HIDROELÉCTRICO TOACHI - PILATÓN
MODELO DE LA PRESA TOACHI 1:50
PRUEBA CON DEFLECTORES DEL DISEÑO ORIGINAL
GRUPO I DEL PLAN DE PRUEBAS

Prueba:	O ₁
Fecha:	22-feb-12

Hora:	11:00
B(cm):	28

VERTEDERO TRIANGULAR DE AFORO			
Cero:	5.37		
Qm(lt):	22.52	h(cm):	23.71

EMBALSE		
Nivel máximo embalse :	msnm	970
Nivel en el embalse :	msnm	967.9

CUENCO AMORTIGUADOR		
Calado en el cuenco	cm	14.7

VERTEDERO DE EXCESOS DERECHO		
Carga sobre la cresta	cm	7.8
Carga sobre el perfil	cm	3.9
Chorro de descarga		
Altura máxima	cm	13.66
Alcance máximo	cm	132
Alcance menor	cm	58.5

OBSERVACIONES:

PROYECTO HIDROELÉCTRICO TOACHI - PILATÓN
MODELO DE LA PRESA TOACHI 1:50
PRUEBA CON DEFLECTORES DEL DISEÑO ORIGINAL

Prueba:	O ₂
Fecha:	22-feb-12

Hora:	12:00
B(cm)	28

VERTEDERO TRIANGULAR DE AFORO				
Cero:	5.37			
Qm(lt):	33.65		h(cm):	27.03

EMBALSE		
Nivel máximo embalse :	msnm	970
Nivel en el embalse :	msnm	969.2

CUENCO AMORTIGUADOR		
Calado en el cuenco	cm	16

VERTEDERO DE EXCESOS DERECHO		
Carga sobre la cresta	cm	9.9
Carga sobre el perfil	cm	4.8
Chorro de descarga		
Altura máxima	cm	14.96
Alcance máximo	cm	135.5
Alcance menor	cm	67.0

OBSERVACIONES:

PROYECTO HIDROELÉCTRICO TOACHI - PILATÓN
MODELO DE LA PRESA TOACHI 1:50
PRUEBA CON LA ALTERNATIVA “A”

Prueba:	A ₁
Fecha:	01-mar-12

Hora:	11:00
B(cm):	28

VERTEDERO TRIANGULAR DE AFORO			
Cero:	5.37		
Qm(lt):	22.46	h(cm):	23.69

EMBALSE		
Nivel máximo embalse :	msnm	970
Nivel en el embalse :	msnm	968

CUENCO AMORTIGUADOR		
Calado en el cuenco	cm	16

VERTEDERO DE EXCESOS DERECHO		
Carga sobre la cresta	cm	7.8
Carga sobre el perfil	cm	3.6
Esquí		
Calado esquí	cm	4.5
Chorro de descarga		
Altura máxima	cm	23.16
Alcance máximo	cm	133
Alcance menor	cm	54

OBSERVACIONES:

PROYECTO HIDROELÉCTRICO TOACHI - PILATÓN
MODELO DE LA PRESA TOACHI 1:50
PRUEBA CON LA ALTERNATIVA “A”

Prueba:	A ₂
Fecha:	01-mar-12

Hora:	12:00
B(cm)	28

VERTEDERO TRIANGULAR DE AFORO				
Cero:	5.37			
Qm(lt):	34.25		h(cm):	27.19

EMBALSE		
Nivel máximo embalse :	msnm	970
Nivel en el embalse :	msnm	969.2

CUENCO AMORTIGUADOR		
Calado en el cuenco.	cm	18

VERTEDERO DE EXCESOS DERECHO		
Carga sobre la cresta	cm	10.2
Carga sobre el perfil	cm	3.5
Esquí		
Calado esquí	cm	6.5
Chorro de descarga		
Altura máxima	cm	20.66
Alcance máximo	cm	138
Alcance menor	cm	52.5

OBSERVACIONES:

PROYECTO HIDROELÉCTRICO TOACHI - PILATÓN
MODELO DE LA PRESA TOACHI 1:50
PRUEBA CON LA ALTERNATIVA “A-1”

Prueba:	A-1 ₁
Fecha:	02-mar-12

Hora:	11:00
B(cm):	28

VERTEDERO TRIANGULAR DE AFORO			
Cero:	5.37		
Qm(lt):	36.21	h(cm):	27.7

EMBALSE		
Nivel máximo embalse :	msnm	970
Nivel en el embalse :	msnm	969.2

CUENCO AMORTIGUADOR		
Calado en el cuenco	cm	18

VERTEDERO DE EXCESOS DERECHO		
Carga sobre la cresta	cm	10.7
Carga sobre el perfil	cm	3.8
Esquí		
Calado esquí	cm	5.7
Chorro de descarga		
Altura máxima	cm	3.16
Alcance máximo	cm	118
Alcance menor	cm	-

OBSERVACIONES:

PROYECTO HIDROELÉCTRICO TOACHI - PILATÓN
MODELO DE LA PRESA TOACHI 1:50
PRUEBA CON LA ALTERNATIVA “B”

Prueba:	B ₁
Fecha:	09-mar-12

Hora:	11:00
B(cm):	28

VERTEDERO TRIANGULAR DE AFORO			
Cero:	5.37		
Qm(lt):	22.81	h(cm):	23.81

EMBALSE		
Nivel máximo embalse :	msnm	970
Nivel en el embalse :	msnm	967.9

CUENCO AMORTIGUADOR		
Calado en el cuenco	cm	10.7

VERTEDERO DE EXCESOS DERECHO		
Carga sobre la cresta	cm	7.7
Carga sobre el perfil	cm	3.5
Esquí		
Calado deflector (derecho)	cm	2.5
Calado deflector (central)	cm	3.0
Calado deflector (izquierdo)	cm	3.0
Chorro de descarga		
Altura máxima (derecho)	cm	16.16
Altura máxima (central)	cm	15.66
Altura máxima (izquierdo)	cm	13.16
Alcance máximo (derecho)	cm	110
Alcance máximo (central)	cm	124
Alcance máximo (izquierdo)	cm	138

OBSERVACIONES:

PROYECTO HIDROELÉCTRICO TOACHI - PILATÓN
MODELO DE LA PRESA TOACHI 1:50
PRUEBA CON LA ALTERNATIVA “B”

Prueba:	B ₂
Fecha:	09-mar-12

Hora:	11:00
B(cm)	28

VERTEDERO TRIANGULAR DE AFORO			
Cero:	5.37		
Qm(lt):	34.29	h(cm):	27.2

EMBALSE			
Nivel máximo embalse :		msnm	970
Nivel en el embalse :		msnm	969.2

CUENCO AMORTIGUADOR			
Calado en el cuenco		cm	14.8

VERTEDERO DE EXCESOS DERECHO		
Carga sobre la cresta	cm	10.5
Carga sobre el perfil	cm	5
Esquí		
Calado deflector (derecho)	cm	3.5
Calado deflector (central)	cm	5.5
Calado deflector (izquierdo)	cm	5
Chorro de descarga		
Altura máxima (derecho)	cm	21.16
Altura máxima (central)	cm	18.66
Altura máxima (izquierdo)	cm	15.36
Alcance máximo (derecho)	cm	123
Alcance máximo (central)	cm	141
Alcance máximo (izquierdo)	cm	131

OBSERVACIONES:

PROYECTO HIDROELÉCTRICO TOACHI - PILATÓN
MODELO DE LA PRESA TOACHI 1:50
PRUEBA CON LA ALTERNATIVA “C”

Prueba:	C ₁
Fecha:	03-abr-12

Hora:	11:00
B(cm):	28

VERTEDERO TRIANGULAR DE AFORO			
Cero:	5.37		
Qm(lt):	22.78	h(cm):	23.8

EMBALSE		
Nivel máximo embalse :	msnm	970
Nivel en el embalse :	msnm	968

CUENCO AMORTIGUADOR		
Calado en el cuenco	cm	14

VERTEDERO DE EXCESOS DERECHO		
Carga sobre la cresta	cm	8.00
Carga sobre el perfil	cm	3.30
Esquí		
Calado deflector (derecho)	cm	2.50
Calado deflector (izquierdo)	cm	3.50
Chorro de descarga		
Altura máxima (derecha)	cm	8.66
Altura máxima (izquierda)	cm	14.66
Alcance máximo	cm	138.00
Alcance menor	cm	104.00

OBSERVACIONES:

PROYECTO HIDROELÉCTRICO TOACHI - PILATÓN
MODELO DE LA PRESA TOACHI 1:50
PRUEBA CON LA ALTERNATIVA “C”

Prueba:	C ₂
Fecha:	02-abr-12

Hora:	11:00
B(cm)	28

VERTEDERO TRIANGULAR DE AFORO			
Cero:	5.37		
Qm(lt):	33.98	h(cm):	27.12

EMBALSE		
Nivel máximo embalse :	msnm	970
Nivel en el embalse :	msnm	969.5

CUENCO AMORTIGUADOR		
Calado en el cuenco	cm	16

VERTEDERO DE EXCESOS DERECHO		
Carga sobre la cresta	cm	10.00
Carga sobre el perfil	cm	5.00
Esquí		
Calado deflector (derecho)	cm	3.50
Calado deflector (izquierdo)	cm	5.00
Chorro de descarga		
Altura máxima (derecha)	cm	12.16
Altura máxima (izquierda)	cm	19.16
Alcance máximo	cm	141.00
Alcance menor	cm	106.00

OBSERVACIONES:

PROYECTO HIDROELÉCTRICO TOACHI - PILATÓN
MODELO DE LA PRESA TOACHI 1:50
PRUEBA CON LA ALTERNATIVA “D”

Prueba:	D ₁
Fecha:	03-abr-12

Hora:	11:00
B(cm):	28

VERTEDERO TRIANGULAR DE AFORO			
Cero:	5.37		
Qm(lt):	22.52	h(cm):	23.71

EMBALSE		
Nivel máximo embalse :	msnm	970
Nivel en el embalse :	msnm	967.9

CUENCO AMORTIGUADOR		
Calado en el cuenco	cm	12

VERTEDERO DE EXCESOS DERECHO		
Carga sobre la cresta	cm	7.50
Carga sobre el perfil	cm	3.60
Esquí		
Calado esquí contracción	cm	4.50
Calado deflector	cm	1.80
Calado esquí central	cm	4.30
Calado deflector	cm	1.80
Calado esquí	cm	3.50
Chorro de descarga		
Altura máxima	cm	16.16
Alcance máxima	cm	134.00

OBSERVACIONES:

PROYECTO HIDROELÉCTRICO TOACHI - PILATÓN
MODELO DE LA PRESA TOACHI 1:50
PRUEBA CON LA ALTERNATIVA “D”

Prueba:	D ₂
Fecha:	02-abr-12

Hora:	11:00
B(cm)	28

VERTEDERO TRIANGULAR DE AFORO				
Cero:	5.37			
Qm(lt):	33.87		h(cm):	27.09

EMBALSE		
Nivel máximo embalse :	msnm	970
Nivel en el embalse :	msnm	969.5

CUENCO AMORTIGUADOR		
Calado en el cuenco	cm	16

VERTEDERO DE EXCESOS DERECHO		
Carga sobre la cresta	cm	9.50
Carga sobre el perfil	cm	5.50
Esquí		
Calado esquí contracción	cm	6.50
Calado deflector	cm	3.50
Calado esquí central	cm	5.00
Calado deflector	cm	3.50
Calado esquí	cm	4.00
Chorro de descarga		
Altura máxima	cm	15.66
Alcance máxima	cm	142.50
Alcance menor	cm	104.50

OBSERVACIONES:

PROYECTO HIDROELÉCTRICO TOACHI - PILATÓN
MODELO DE LA PRESA TOACHI 1:50
GRUPO II DE PLAN DE PRUEBAS

Prueba:	DA	Hora:	15:30
Fecha:	25-jun-12	B(cm):	28

VERTEDERO TRIANGULAR DE AFORO			
Cero:	11.77		
Qm(lt):	68.06	h(cm):	40.77

EMBALSE		
Nivel máximo embalse :	msnm	970
Nivel en el embalse :	msnm	969.7

CALADO SOBRE EL VERTEDERO		
	Lecturas limnímetros	
1.-Eje Sarapullo	cm	41.08
2.- Eje vertedero derecho	cm	43.07
3.- Eje Presa	cm	43.28
4.- Eje vertedero izquierdo	cm	43.46

CUENCO AMORTIGUADOR		
Calado en el cuenco	cm	25

VERTEDERO DE EXCESOS		DERECHO	IZQUIERDO
Carga sobre la cresta	cm	9.0	9.0
Carga sobre el perfil	cm	5.0	5.0
Esquí			
Calado esquí contracción	cm	6.5	5.5
Calado deflector	cm	3.5	3.0
Calado esquí central	cm	5.4	5.2
Calado deflector	cm	3.0	3.0
Calado esquí	cm	4.6	4.5
Chorro de descarga			
Altura máxima	cm	124.4	123.2
Alcance máximo	cm	135	135
Alcance menor	cm	89	88
Ancho (hmax)	cm	30	32.5
Ancho (impacto)	cm	36	37.5

OBSERVACIONES:

PROYECTO HIDROELÉCTRICO TOACHI - PILATÓN
MODELO DE LA PRESA TOACHI 1:50
GRUPO II DE PLAN DE PRUEBAS

Prueba:	DB	Hora:	10.49
Fecha:	25-jun-12	B(cm)	28

VERTEDERO TRIANGULAR DE AFORO			
Cero:	11.77		
Qm(lt):	56.71	h(cm):	38.66

EMBALSE		
Nivel máximo embalse :	msnm	970
Nivel en el embalse :	msnm	969

CALADO SOBRE EL VERTEDERO		
Lecturas limnímetros		
1.-Eje Sarapullo	cm	39.39
2.- Eje vertedero derecho	cm	41.41
3.- Eje Presa	cm	41.59
4.- Eje vertedero izquierdo	cm	41.6

CUENCO AMORTIGUADOR		
Calado en el cuenco	cm	23

VERTEDERO DE EXCESOS		DERECHO	IZQUIERDO
Carga sobre la cresta	cm	9.0	9.0
Carga sobre el perfil	cm	4.5	4.3
Esquí			
Calado esquí contracción	cm	4.5	5.0
Calado deflector	cm	2.8	2.4
Calado esquí central	cm	4.8	4.5
Calado deflector	cm	2.3	2.4
Calado esquí	cm	4.0	4.0
Chorro de descarga			
Altura máxima	cm	122.4	121
Alcance máximo	cm	127	127
Alcance menor	cm	88	88
Ancho (hmax)	cm	28	28
Ancho (impacto)	cm	35	35

OBSERVACIONES:

PROYECTO HIDROELÉCTRICO TOACHI - PILATÓN
MODELO DE LA PRESA TOACHI 1:50
GRUPO II DE PLAN DE PRUEBAS

Prueba:	DC	Hora:	13:00
Fecha:	25-jun-12	B(cm)	28

VERTEDERO TRIANGULAR DE AFORO			
Cero:	11.77		
Qm(lt):	39.67	h(cm):	34.96

EMBALSE		
Nivel máximo embalse :	msnm	970
Nivel en el embalse :	msnm	967.7

CALADO SOBRE EL VERTEDERO		
Lecturas limnímetros		
1.-Eje Sarapullo	cm	36.83
2.- Eje vertedero derecho	cm	38.87
3.- Eje Presa	cm	39.12
4.- Eje vertedero izquierdo	cm	39.25

CUENCO AMORTIGUADOR		
Calado en el cuenco	cm	17.5

VERTEDERO DE EXCESOS		DERECHO	IZQUIERDO
Carga sobre la cresta	cm	7.8	7.8
Carga sobre el perfil	cm	2.8	3.4
Esquí			
Calado esquí contracción	cm	3.5	3.6
Calado deflector	cm	1.8	1.5
Calado esquí central	cm	3.5	3.5
Calado deflector	cm	1.6	1.5
Calado esquí	cm	2.7	3.0
Chorro de descarga			
Altura máxima	cm	120.4	121.5
Alcance máximo	cm	124	122
Alcance menor	cm	99	97
Ancho (hmax)	cm	25.5	26
Ancho (impacto)	cm	26.5	26.5

OBSERVACIONES:

PROYECTO HIDROELÉCTRICO TOACHI - PILATÓN
MODELO DE LA PRESA TOACHI 1:50
GRUPO II DE PLAN DE PRUEBAS

Prueba:	DD	Hora:	10:00
Fecha:	27-jun-12	B(cm)	28

VERTEDERO TRIANGULAR DE AFORO			
Cero:	11.77		
Qm(lt):	28.26	h(cm):	31.92

EMBALSE		
Nivel máximo embalse :	msnm	970
Nivel en el embalse :	msnm	966.5

CALADO SOBRE EL VERTEDERO		
Lecturas limnímetros		
1.-Eje Sarapullo	cm	34.83
2.- Eje vertedero derecho	cm	36.89
3.- Eje Presa	cm	37.09
4.- Eje vertedero izquierdo	cm	37.28

CUENCO AMORTIGUADOR		
Calado en el cuenco	cm	15.2

VERTEDERO DE EXCESOS		DERECHO	IZQUIERDO
Carga sobre la cresta	cm	5.8	6.4
Carga sobre el perfil	cm	1.7	2.1
Esquí			
Calado esquí contracción	cm	2.5	2.5
Calado deflector	cm	0.9	1.1
Calado esquí central	cm	2.5	2.8
Calado deflector	cm	1.1	1.0
Calado esquí	cm	2.0	2.3
Chorro de descarga			
Altura máxima	cm	117.2	120.8
Alcance máximo	cm	114.6	113.5
Alcance menor	cm	92.7	90
Ancho (hmax)	cm	27	27
Ancho (impacto)	cm	25.5	26

OBSERVACIONES:

PROYECTO HIDROELÉCTRICO TOACHI - PILATÓN
MODELO DE LA PRESA TOACHI 1:50
GRUPO II DE PLAN DE PRUEBAS

Prueba:	DE	Hora:	15.35
Fecha:	27-jun-12	B(cm)	28

VERTEDERO TRIANGULAR DE AFORO			
Cero:	11.77		
Qm(lt):	11.19	h(cm):	25.5

EMBALSE		
Nivel máximo embalse :	msnm	970
Nivel en el embalse :	msnm	965

CALADO SOBRE EL VERTEDERO		
Lecturas limnímetros		
1.-Eje Sarapullo	cm	31.33
2.- Eje vertedero derecho	cm	33.35
3.- Eje Presa	cm	33.58
4.- Eje vertedero izquierdo	cm	33.66

CUENCO AMORTIGUADOR		
Calado en el cuenco	cm	10

VERTEDERO DE EXCESOS		DERECHO	IZQUIERDA
Carga sobre la cresta	cm	3.1	3.9
Carga sobre el perfil	cm	0.9	1.1
Esquí			
Calado esquí contracción	cm	1.2	1.1
Calado deflector	cm	0.5	0.5
Calado esquí central	cm	1.3	1.4
Calado deflector	cm	0.6	0.6
Calado esquí	cm	1.0	1.0
Chorro de descarga			
Altura máxima	cm	114.3	116.5
Alcance máximo	cm	88	90
Alcance menor	cm	74	75
Ancho (hmax)	cm	4.5	4.5
Ancho (impacto)	cm	28.5	29.5

OBSERVACIONES:

ANEXO No.2.- REGISTRO FOTOGRÁFICO DE LAS PRUEBAS REALIZADAS

A continuación se muestran las fotografías más relevantes recolectadas durante todas las pruebas de investigación experimental.

Deflectores Diseño Original:

$$Q = 398 \text{ m}^3/\text{s}$$



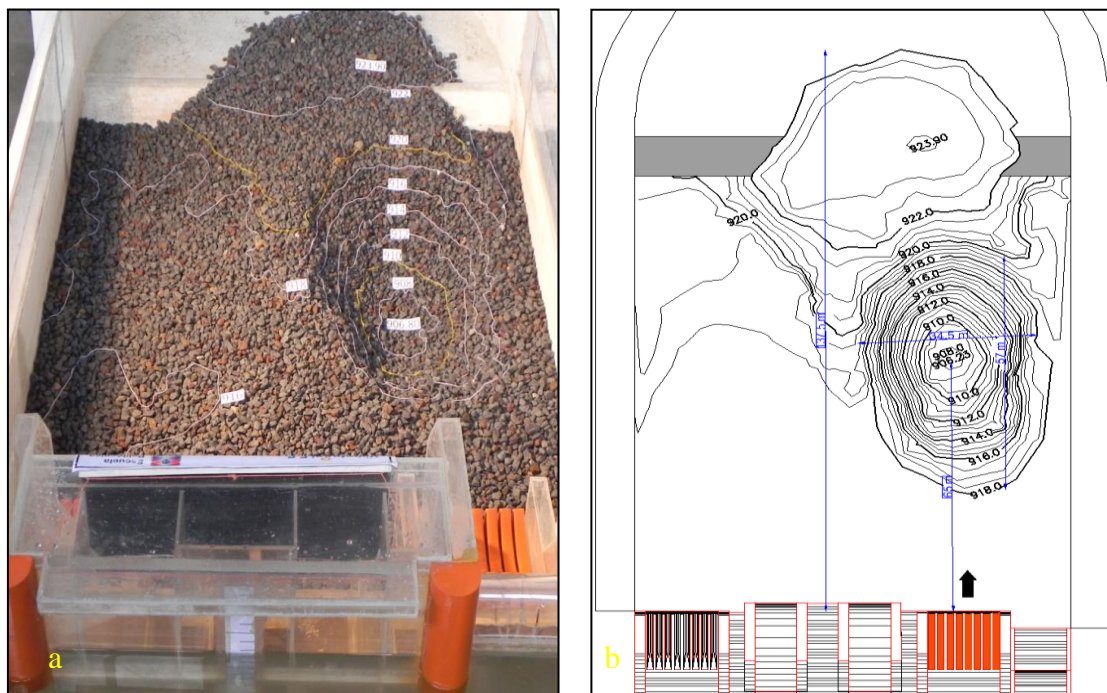
Fotografía No. 1: Vista desde aguas abajo al chorro, diseño original



Fotografía No. 2: Vista lateral del chorro, diseño original



Fotografía No. 3: Vista superior del chorro, diseño original



Fotografía No. 4: Vista superior del cuenco socavado diseño original (a); Levantamiento topográfico diseño original (b)

$$Q = 594.78 \text{ m}^3/\text{s}$$



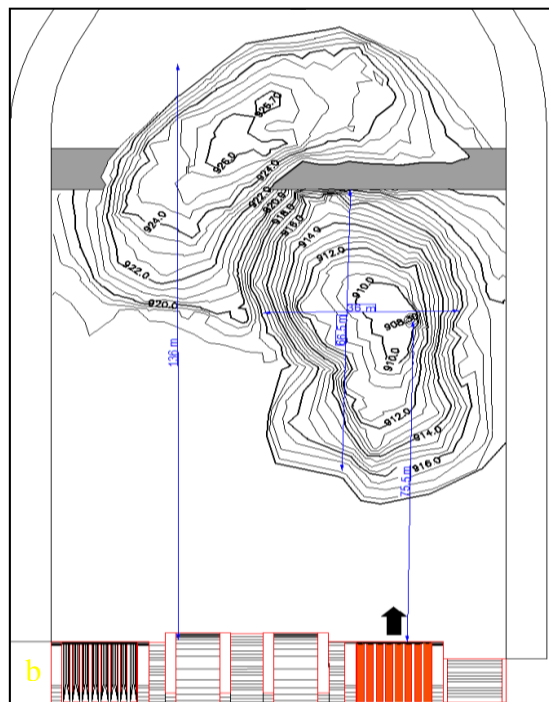
Fotografía No. 5: Vista lateral del chorro, diseño original



Fotografía No. 6: Vista desde aguas abajo al chorro, diseño original



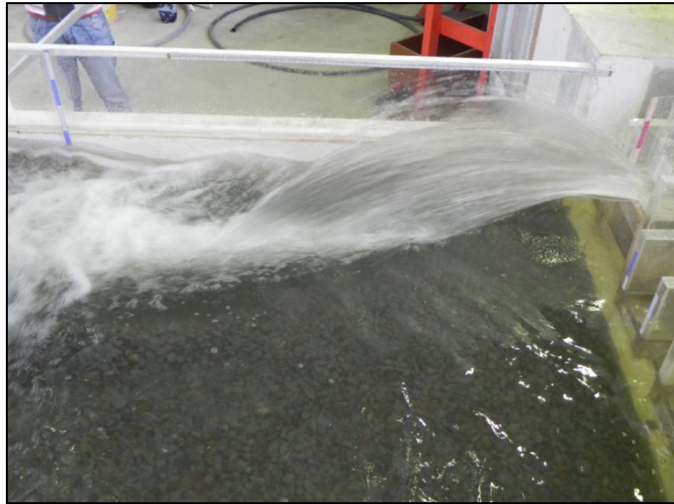
Fotografía No. 7: Vista superior del chorro, diseño original



Fotografía No. 8: Vista superior del cuenco socavado diseño original (a); Levantamiento topográfico diseño original (b)

Alternativa A: Paredes convergentes

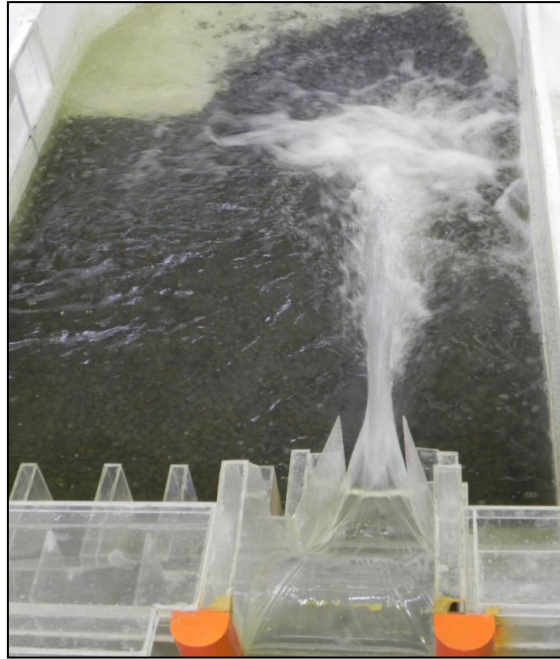
$$Q = 397 \text{ m}^3/\text{s}$$



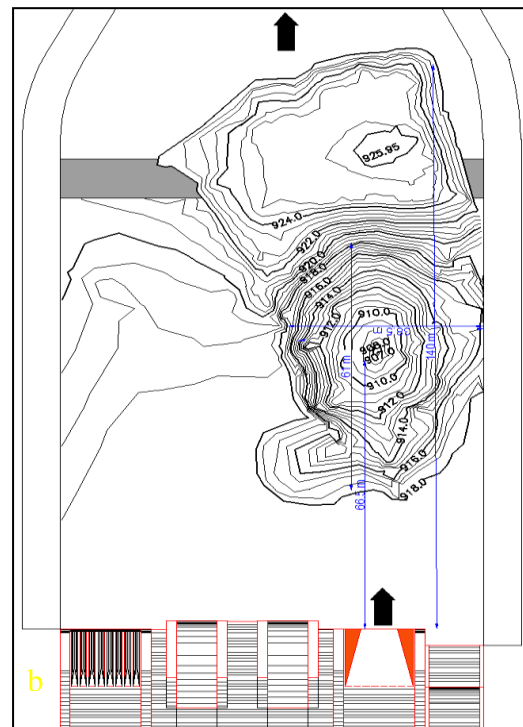
Fotografía No. 9: Vista lateral del chorro, Alternativa A



Fotografía No. 10: Vista desde aguas abajo del chorro, Alternativa A

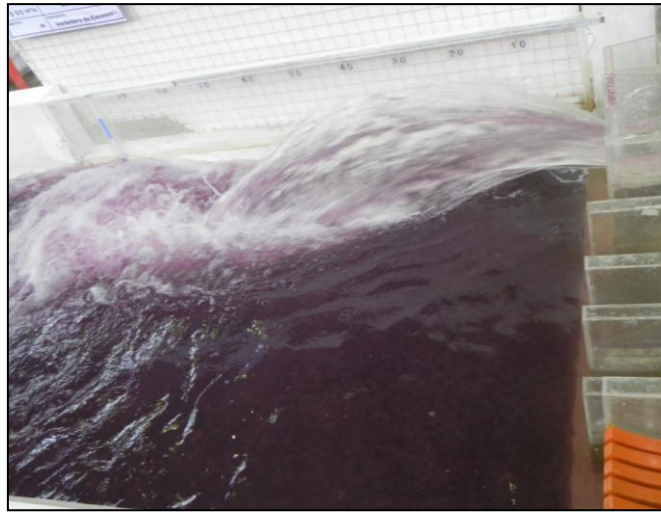


Fotografía No.11: Vista superior del chorro



Fotografía No. 12: Vista superior del cuenco socavado alternativa A (a); Levantamiento topográfico alternativa A (b)

$$Q = 605.4 \text{ m}^3/\text{s}$$



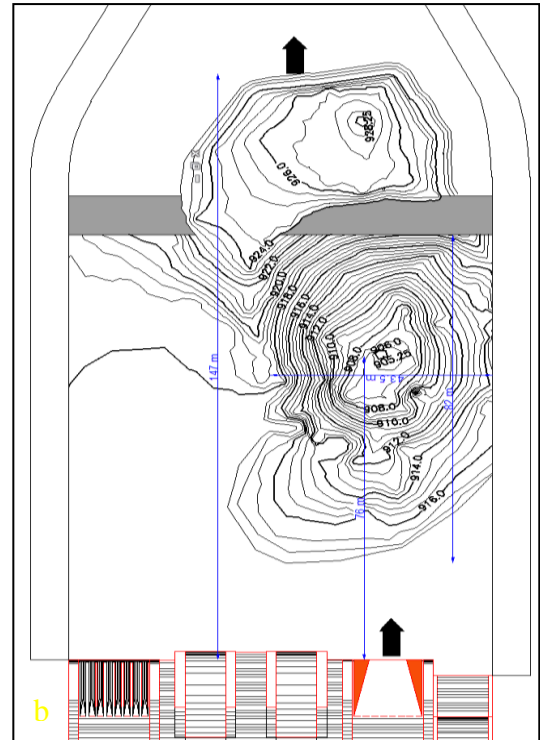
Fotografía No.13: Vista lateral del chorro, Alternativa A



Fotografía No.14: Vista superior del chorro, Alternativa A



Fotografía No.15: Vista desde aguas abajo al chorro, Alternativa A



Fotografía No.16: Vista superior del cuenco socavado alternativa A (a); Levantamiento topográfico alternativa A (b)

Alternativa A – 1: Contracción lateral derecha

$Q = 606.1 \text{ m}^3/\text{s}$



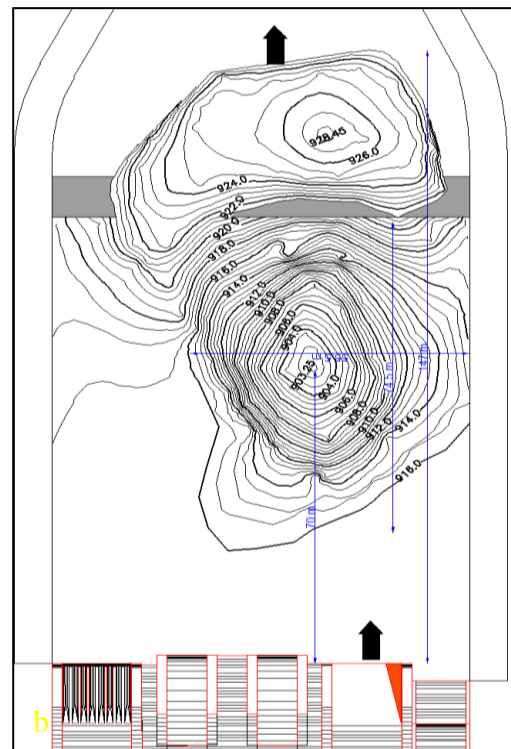
Fotografía No.17: Vista lateral del chorro, Alternativa A-1



Fotografía No. 18: Vista superior del chorro, Alternativa A-1



Fotografía No. 19: Vista desde aguas abajo al chorro



Fotografía No.20: Vista superior del cuenco socavado alternativa A -1(a); Levantamiento topográfico alternativa A-1 (b)

Alternativa B: Deflectores de alturas variables

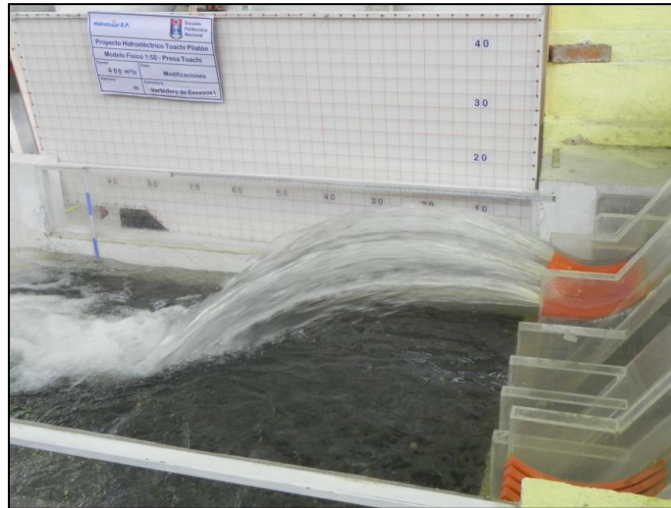
$$Q = 403.3 \text{ m}^3/\text{s}$$



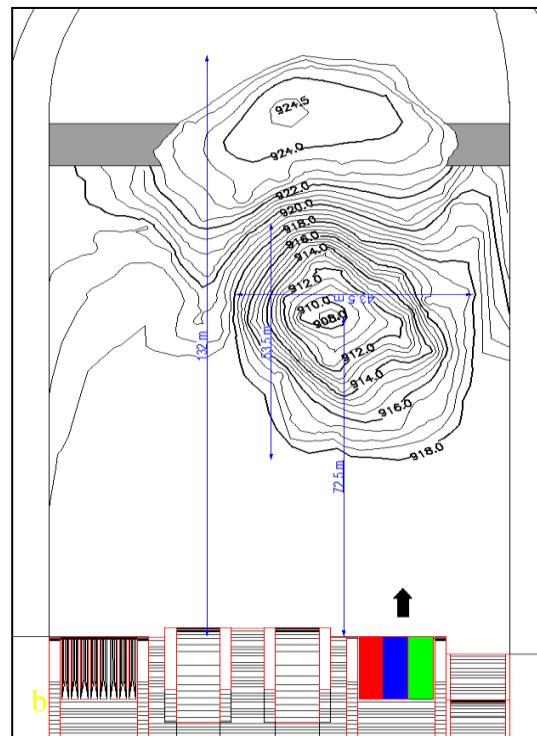
Fotografía No.21: Vista superior del chorro, Alternativa B



Fotografía No.22: Vista desde aguas abajo al chorro, Alternativa B



Fotografía No. 23: Vista lateral del chorro, Alternativa B



Fotografía No.24: Vista superior del cuenco socavado alternativa B(a); Levantamiento topográfico alternativa B (b)

$$Q = 606 \text{ m}^3/\text{s}$$



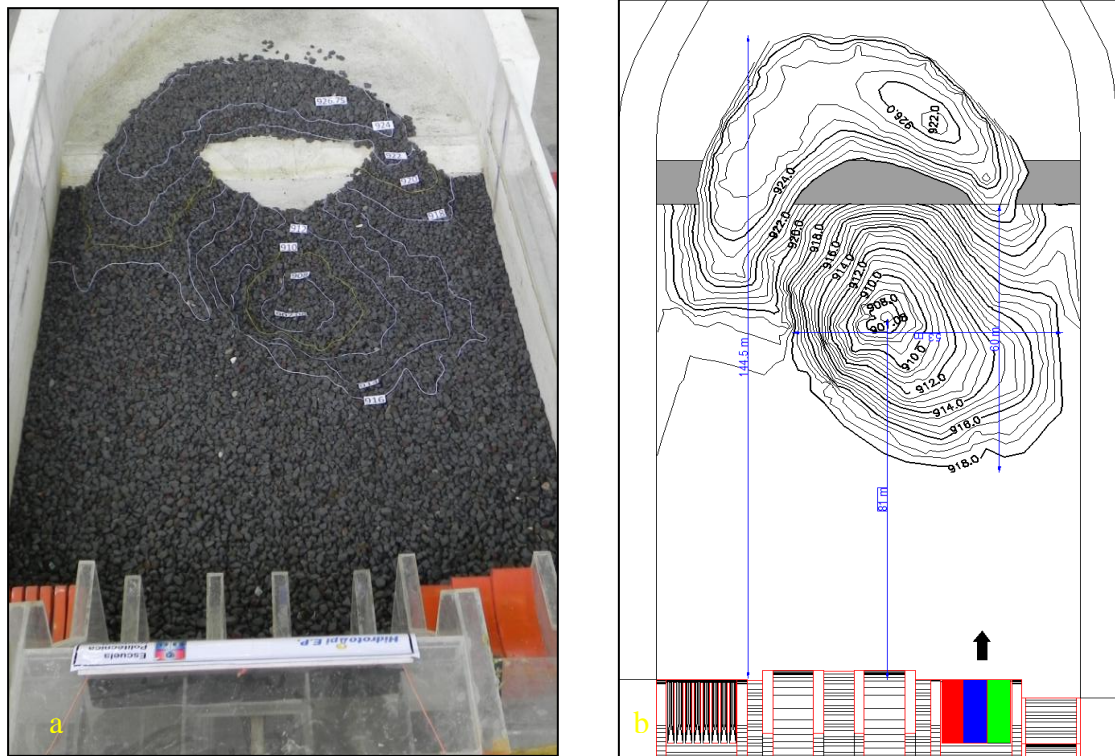
Fotografía No.25: Vista lateral del chorro, Alternativa B



Fotografía No.26: Vista superior del chorro, Alternativa B



Fotografía No.27: Vista desde aguas abajo al chorro, Alternativa B



Fotografía No.28: Vista superior del cuenco socavado alternativa B(a); Levantamiento topográfico alternativa B (b)

Alternativa C: Deflector peraltado

$$Q = 402.8 \text{ m}^3/\text{s}$$



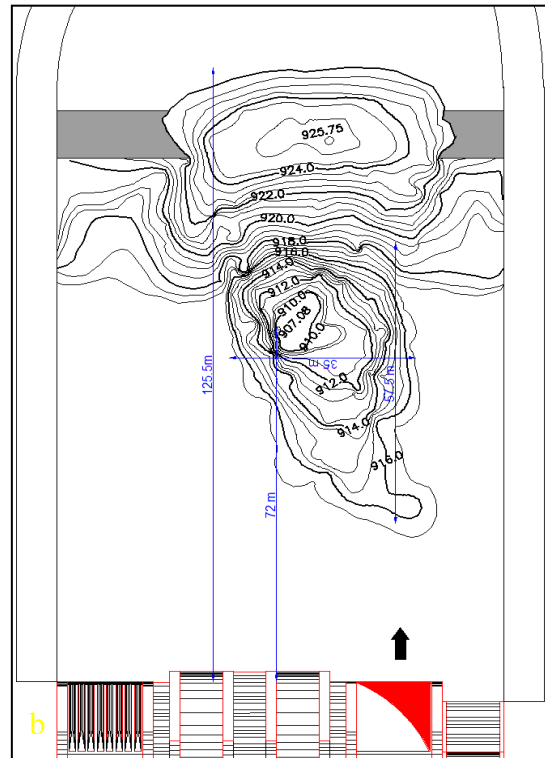
Fotografía No.29: Vista superior del chorro, Alternativa C



Fotografía No.30: Vista desde aguas abajo al chorro, Alternativa C

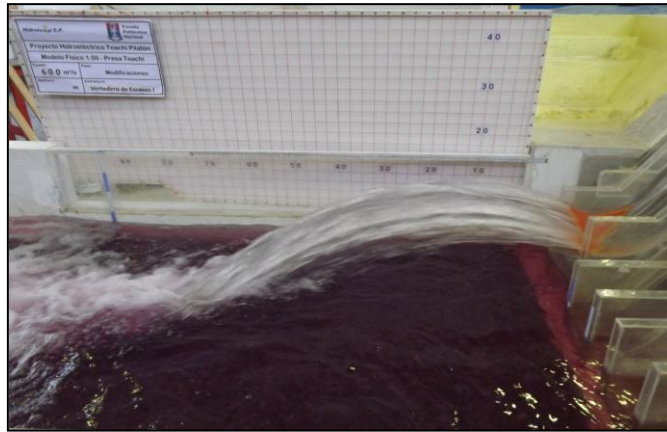


Fotografía No. 31: Vista lateral del chorro, Alternativa C

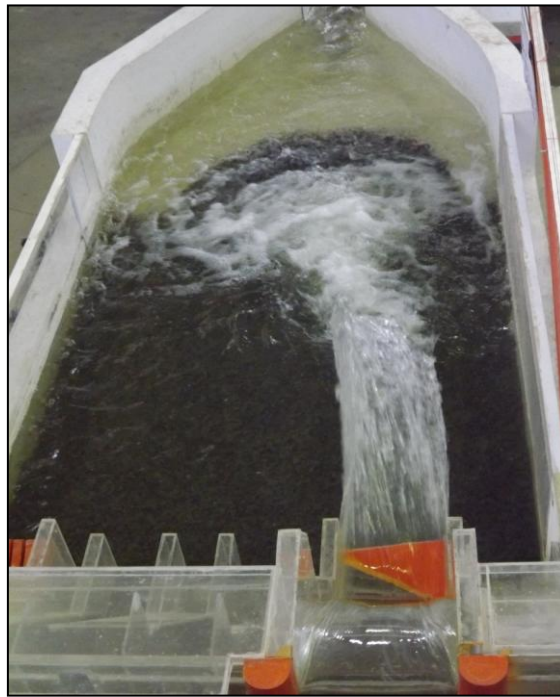


Fotografía No.32: Vista superior del cuenco socavado alternativa C (a); Levantamiento topográfico alternativa C (b)

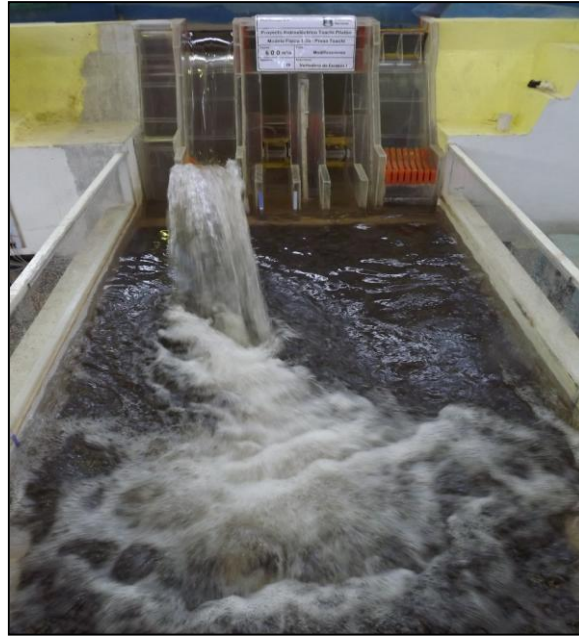
$$Q = 600.8 \text{ m}^3/\text{s}$$



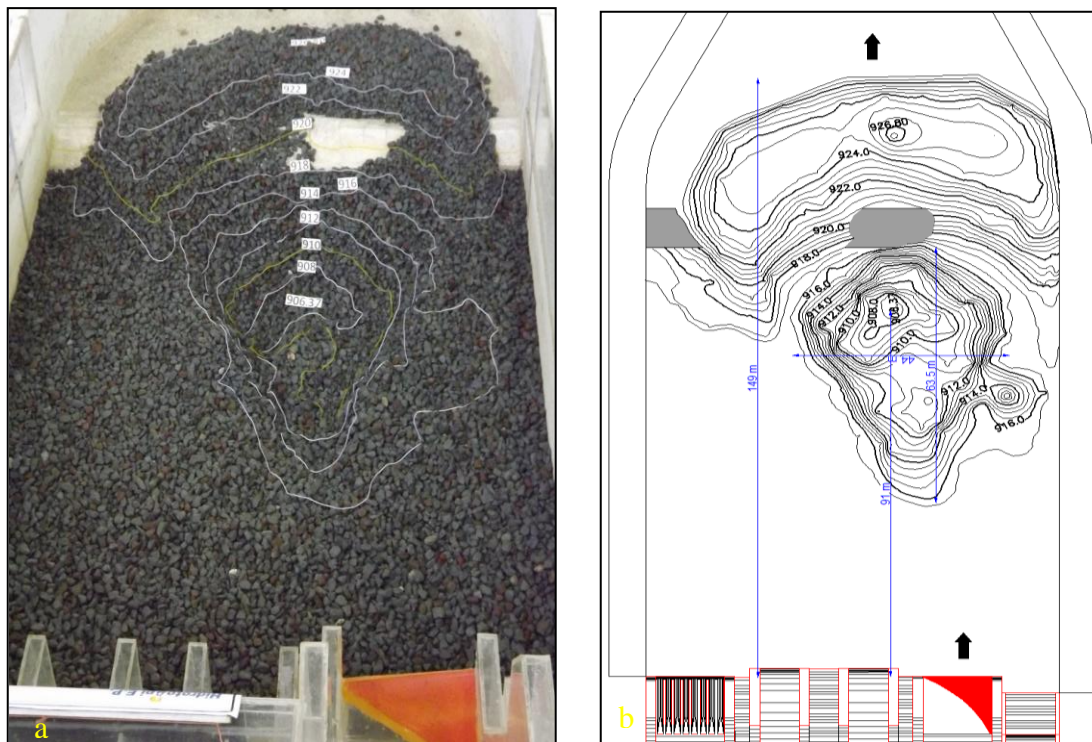
Fotografía No.33: Vista lateral del chorro, Alternativa C



Fotografía No.34: Vista superior del chorro, Alternativa C



Fotografía No.35: Vista desde aguas abajo al chorro, Alternativa C



Fotografía No.36: Vista superior del cuenco socavado alternativa C (a); Levantamiento topográfico alternativa C (b)

Alternativa D: Deflectores trapezoidales y contracción lateral derecha

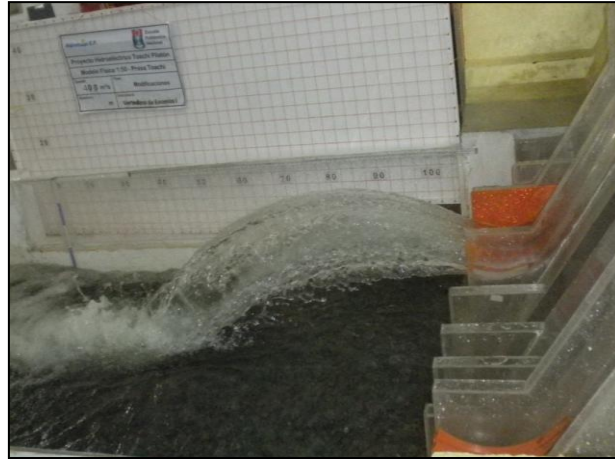
$$Q = 395.9 \text{ m}^3/\text{s}$$



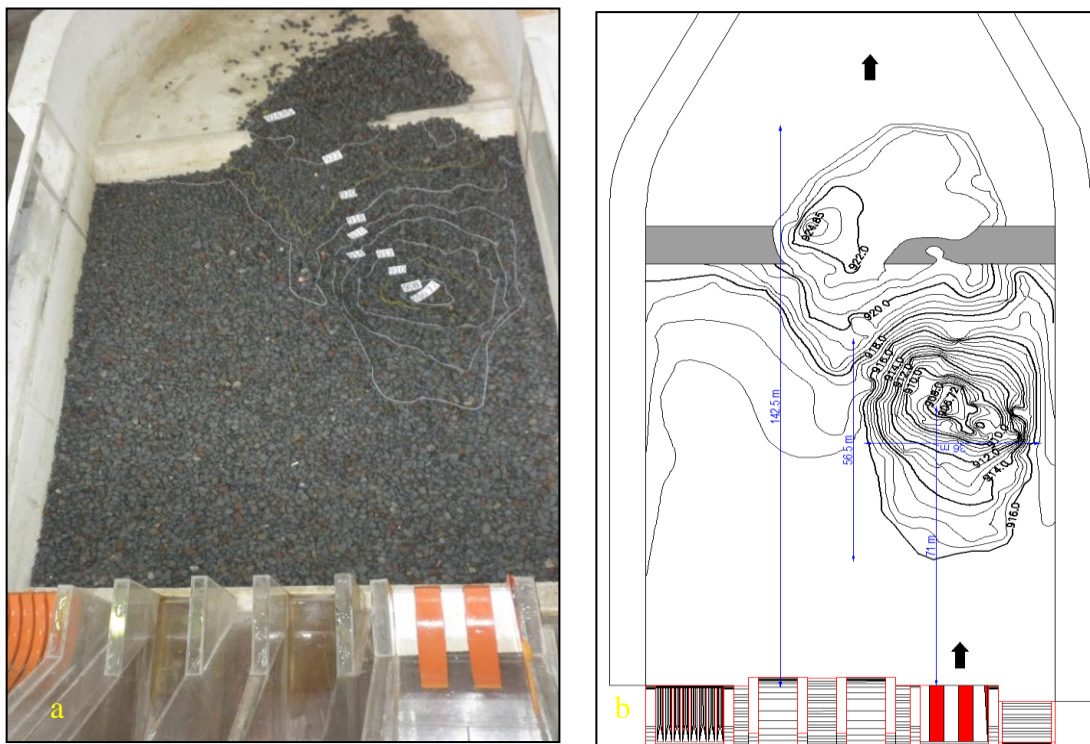
Fotografía No.37: Vista superior del chorro, Alternativa D



Fotografía No.38: Vista desde aguas abajo al chorro, Alternativa D



Fotografía No.39: Vista lateral del chorro, Alternativa D



Fotografía No.40: Vista superior del cuenco socavado alternativa D (a); Levantamiento topográfico alternativa D (b)

$$Q = 598.8 \text{ m}^3/\text{s}$$



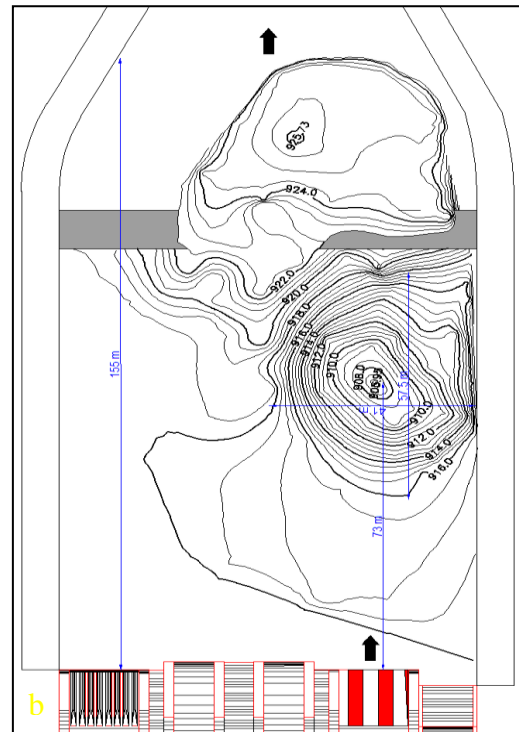
Fotografía No.41: Vista lateral del chorro, Alternativa D



Fotografía No.42: Vista superior del chorro, Alternativa D



Fotografía No. 43: Vista desde aguas abajo al chorro, Alternativa D



Fotografía No.44: Vista superior del cuenco socavado alternativa D (a); Levantamiento topográfico alternativa D (b)

ANEXO No.3.- PLANOS